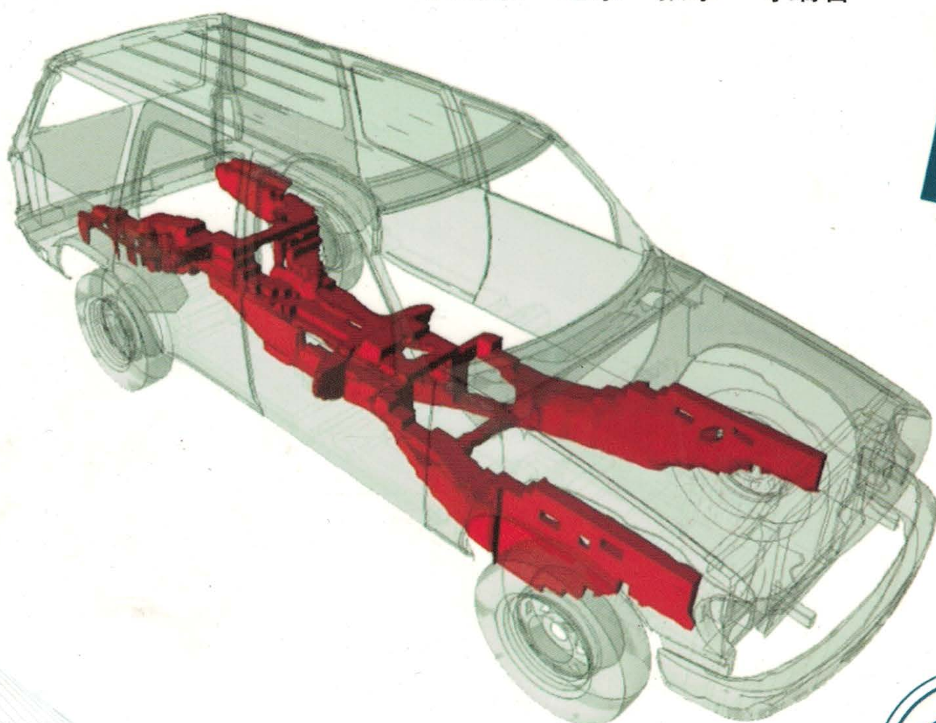
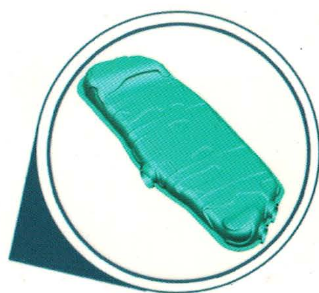
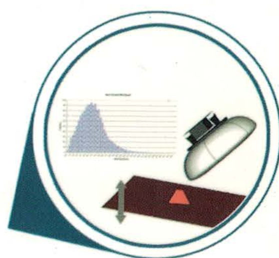
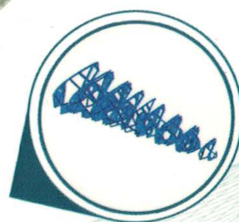
HyperWorks进阶教程系列

OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用

洪清泉 赵康 张攀 等编著


附赠超值 DVD 光盘

- 全书练习实例模型文件+视频讲解
- Altair中国HyperWorks技术大会论文集




机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

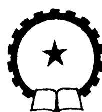
VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

HyperWorks 进阶教程系列

OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用

洪清泉　赵　康　张　攀　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书主要介绍了 OptiStruct 和 HyperStudy 的理论方法、基础练习、使用技巧和工程应用。

全书分上、下两篇。上篇是 OptiStruct 部分，主要介绍 OptiStruct 的基础理论和各种优化技术，以及部分优化卡片说明，并提供了大量实例练习和行业工程案例；下篇是 HyperStudy 部分，主要介绍 HyperStudy 的各种系统研究和优化方法，并提供了集成不同求解器进行优化设计的大量练习和案例。

本书由 Altair 中国公司技术团队编写，是 Altair 中国公司推荐的 HyperWorks 软件培训用书，可作为机械、汽车、航空航天、船舶、军工、重型装备、电子及家电等相关行业工程技术人员的自学或参考用书，也可作为理工院校相关专业师生学习或者教学用书。

图书在版编目（CIP）数据

OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用 / 洪清泉等编著. —北京：机械工业出版社，2012.12

（HyperWorks 进阶教程系列）

ISBN 978-7-111-40462-0

Ⅰ. ①O…　Ⅱ. ①洪…　Ⅲ. ①有限元分析－应用软件－教材

Ⅳ. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 274969 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：丁　诚　张淑谦

责任编辑：张淑谦　罗子超　吴超莉　范成欣

责任印制：杨　曦

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版 • 第 1 次印刷

184mm×260mm • 33.5 印张 • 830 千字

0001－4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-40462-0

ISBN 978-7-89433-215-8（光盘）

定价：99.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010) 88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：(010) 68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010) 88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010) 88379203	封面无防伪标均为盗版

序　　一

Altair 公司于 1985 年从工程咨询起家，在 1989 年发布了 HyperMesh 软件，并很快在汽车业得到广泛认同，从此激发了 Altair 在软件上投入的热情。1994 年，Altair 推出了 OptiStruct 模块，当年即获得《工业周刊》（Industry Week）年度技术奖。随后的几年，Altair 通过收购和开发，扩展了一系列模块，并于 1999 年整合成 HyperWorks 软件包。在 2006 年收购 RADIOSS 软件后，Altair 终于在结构仿真和优化方面形成了完整的产品系列。

2012 是 Altair 进入中国的第 11 个年头，在这 11 年中，在 Altair 中国同仁的不懈努力下，Altair 中国业务有了长足的发展，HyperWorks 用户群也逐渐壮大。为此，2007 年开始，我们每年举办 HyperWorks 技术大会（HTC）暨 Altair 用户年会。在会上，不仅有大会主题发言，还有大量的用户论文交流。2007 年，上海的第一届 HTC 大会就收到了 70 多篇论文，大部分是关于 HyperMesh 的应用。2008 年，在北京的第二届 HTC 大会上开始有一些制造仿真技术（HyperXtrude/HyperForm）方面的论文。2009～2010 年，在上海的第三、四届 HTC 大会上论文数都超过了 120 篇，内容涵盖的行业更广，应用的模块更多，涌现了大量的有限元求解、多体动力学仿真（MotionSolve）、优化设计及二次开发的成功案例。

Altair 早些年的成功基本上得益于好的产品以及技术人员的口口相传。Altair 的业务模式也为 HyperWorks 的普及提供了强有力的支持，使得高端 CAE 的进入门槛大大降低。随着业务的飞速发展，要求使用 HyperWorks 的技术人员也越来越多，大家迫切希望有一些更好的教程，能帮助他们更快地上手、更系统地学习、更深入地应用。在这样的背景下，我们组织编写了 HyperWorks 进阶教程系列：《HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例》、《OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用》、《RADIOSS 理论基础与工程应用》，以满足广大 CAE 工程师及爱好者的要求，并帮助高校学子更快掌握 HyperWorks 的软件应用。

无论您是新入行，还是已在这一行工作多年，您一定会为 CAE 工具的多样化伤透脑筋。HyperWorks 在高端 CAE 技术上提供了一站式解决方案，不仅使系统精简，同时又可同其他系统共享 CAE 模型，更进一步将目前的主流 CAE 求解器集成在统一的环境上，组成一个高效的产品研发平台，从而将创新、成本、效率有机结合起来，构造最有效的产品创新设计平台解决方案。Altair“以用户的成功衡量我们的业绩”的服务理念、不断创新的技术和业务模式、全球工程咨询经验的导入，会助您更上一层楼！

戚国焕

Altair 大中华区总经理

序　　二

2000 年以来，结构优化在工业中的应用取得了迅猛发展。这一趋势受到以下几个因素的驱动。首先，经过近 40 年的积累，结构优化和多学科优化技术及其算法越来越成熟。其次，商业软件在把新兴技术转化为实用工程工具的过程中扮演了重要角色，特别是拓扑优化技术引领了这一潮流。这是因为产品设计意味着创新性和创造性，而拓扑优化可以帮助工程师在概念设计早期阶段跳出思维定式。实践证明，即使在一些工程领域中被认为已经设计得很完美的产品上，拓扑优化也能生成令人惊叹的高性能设计。通过拓扑优化技术，空中客车公司在一组 A380 飞机的前缘翼肋上取得了超过 40%的减重效果。

Altair 公司极大地推动了优化技术的发展，并在优化技术成为主流的工程方法和工具的过程中做出了重要贡献。从 1994 年 OptiStruct 问世以来，OptiStruct 就非常重视拓扑优化技术，并认为它是产品创新设计的革命性工具。在过去 15 年的研发中，OptiStruct 重点关注了以下几个在实际应用中非常重要的方面：（1）对于概念设计，必须在优化模型中考虑制造可行性；（2）工程结构有不同应用，因此，软件应该为工程师提供能够表征设计问题的一般方案；（3）对于复杂的分析模型，通常包含大量的设计变量和约束，求解结果的稳健性和效率是关键。

目前，工程领域中最热门的是复合材料结构设计的变革。它的发展主要源自于航空工业对复合材料设计需求的快速增长。全球航空工业正以空前的步伐建造着下一代飞机，而新一代飞机机身将全部使用复合材料。复合材料具有强大的设计潜能，因为层合板材料在整个结构中几乎可以被任意裁剪，然而增加的设计自由度同时也对设计流程和软件带来了新的挑战。OptiStruct 的复合材料优化技术成功应对了这一挑战。

虽然概念设计阶段的优化是产品设计创新的关键，但所有的产品都必须经过详细设计才能完成。OptiStruct 为经典的尺寸和形状优化提供了完整的解决方案。OptiStruct 一直致力于创造一个强健、高效并且易用的优化工具。除此之外，它集成在 HyperWorks 这一全面的 CAE 仿真平台中，得到了优化模型前处理的最大便利。

此外，目前工程领域对复杂多学科系统进行研究和优化的需求也日趋强烈，这已超出了结构优化设计的范畴，需要新的优化引擎以驱动不同学科领域的仿真分析。HyperStudy 是该领域的主要软件之一，完全可以胜任现代产品的各种性能优化。

我要感谢本书的作者，他们承担了这个艰巨的任务——用这本书向工程人员和工科学生系统地介绍了优化技术和实践经验。希望这本书能够为那些开始将优化技术应用于日常工程实践的人士带来灵感，也能够为那些已经熟练掌握优化技术的人士带来更多的专业知识。

周明

Altair 全球副总裁

前　言

技术支持和服务是 Altair 公司的核心竞争力之一。从 2001 年来到中国，Altair 公司就开始建立技术团队，为客户提供快速而全面的软件售前、售后技术支持，把 Altair 全球产品创新技术和工程咨询经验带给中国市场。过去的 10 年，正是 CAE 技术引领国内广大制造业企业进行产品创新设计，提升产品竞争力的 10 年。Altair 公司恰逢其时，以其企业级 CAE 驱动创新平台 HyperWorks 助力中国制造业自主创新。Altair 公司见证了许多国内汽车 OEM 厂家的 CAE 队伍从几人到几十人、再到上百人的发展历程；参与了 HyperWorks 在国内航空航天、电子、船舶、轨道交通、重型机械、军工等行业众多型号和产品上的成功应用；与各企业、科研院所、高校的 CAE 工程师和学生相互学习，共同为提高中国 CAE 技术应用水平而努力。

十年弹指一挥间，Altair HyperWorks 软件已从 V5.0 发展到 V11.0，中国技术团队也已发展到 50 多人。Altair 公司在为客户服务的过程中，积累了大量的软件技巧和工程经验，同时也发现许多工程师和学生苦于目前市场上关于 HyperWorks 的中文书籍很少，只能通过一些有限的渠道进行学习和交流，因此深感同广大 HyperWorks 使用者和爱好者分享技术和经验的重要性。

2011 年 6 月，Altair HyperWorks V11.0 正式发布，它包含了众多的新技术和新功能，为广大用户带来超值的 CAE 技术体验。在 Altair 大中华区总经理戚国焕先生的支持下，我们决定以 V11.0 为基础，编写 HyperWorks 进阶教程系列丛书。本书以 HyperWorks 11.0 版本为平台，介绍了 OptiStruct 和 HyperStudy 这两个模块的基本理论方法及工程应用，分上、下两篇，共 18 章。

上篇主要介绍 OptiStruct 结构优化模块，包括第 1～10 章。第 1 章总体介绍 OptiStruct 结构优化技术的基础理论；第 2～5 章介绍拓扑优化、形貌优化、尺寸优化和形状优化技术，并辅以大量实例练习；第 6 章介绍复合材料优化技术；第 7 章介绍等效静态载荷（ESL）技术；第 8 章介绍在热、疲劳和非线性优化方面的一些应用；第 9 章和第 10 章介绍 OptiStruct 在航空航天方面的一些优化案例。

下篇主要介绍 HyperStudy 系统研究及多学科优化模块，包括第 11～18 章。第 11 章介绍 HyperStudy 的各项技术及其理论方法；第 12 章提供了大量的 HyperStudy 基础练习；第 13 章和 14 章介绍了两个特色技术，即 HyperMath 和 Excel 的集成；第 15～17 章介绍了大量基于 Altair 公司求解器，包括 Radioss、MotionSolve 和 HyperForm 的实例；第 18 章为 HyperStudy 与其他求解器相结合的技术和应用。

本书主要由洪清泉、赵康、张攀编写。参与编写的还有 Altair 中国公司技术团队成员罗志凡、徐力敏、易俊杰、徐自立、王晨、林德志、罗强、陈锋、李真、杨少彬、刘文文、陆天宇，在此深表感谢。

由于编者水平有限，书中错误及不足之处在所难免，敬请广大读者不吝指正，也欢迎大家共同探讨，可发邮件至 info@altair.com.cn 进一步联系。

Altair 中国技术团队

目　录

序一
序二
前言

第 1 章　OptiStruct 概述　1

1.1 Altair 公司简介 …… 2
1.2 OptiStruct 优化流程和理论 …… 3
1.2.1 内部优化流程 …… 4
1.2.2 灵敏度分析 …… 4
1.2.3 近似模型拟合 …… 5
1.2.4 寻优策略 …… 6
1.2.5 收敛准则 …… 6
1.2.6 全局搜索功能 …… 6
1.2.7 约束屏蔽 …… 7
1.2.8 域及其作用 …… 8
1.3 性能响应 …… 9
1.3.1 模型响应 …… 10
1.3.2 子工况相关的响应 …… 12
1.3.3 函数响应 …… 15
1.3.4 外部响应 …… 15
1.4 OptiStruct 优化卡片和参数 …… 15
1.5 操作系统平台及性能 …… 18
1.6 OptiStruct 运行参数设置 …… 20
1.7 小结 …… 23

第 2 章　拓扑优化技术实例　24

2.1 拓扑优化技术简介 …… 25
2.1.1 单元密度 …… 25
2.1.2 制造工艺约束 …… 25
2.1.3 OSSmooth 模块介绍 …… 30
2.2 实例：C 形夹结构的概念设计 …… 31
2.3 实例：利用加强筋提高汽车挡板的固有频率 …… 45
2.4 实例：汽车控制臂的概念设计 …… 55
2.5 实例：使用 CWELD 单元进行焊点拓扑优化 …… 70
2.6 实例：利用 DMIG 进行模型缩减的拓扑优化 …… 73
2.7 实例：矩形板的频率响应优化 …… 82
2.8 拓扑优化卡片 …… 97
2.9 小结 …… 105

第 3 章　形貌优化技术实例　106

3.1 实例：受扭平板的形貌优化　107
3.2 实例：利用拓扑和形貌联合优化磁头悬臂　114
3.3 实例：汽车安全带牵引器支架形貌优化　120
3.4 形貌优化卡片简介　127
3.5 autobead 模块简介　133
3.6 小结　133

第 4 章　尺寸优化技术实例　134

4.1 实例：支架的尺寸优化　135
4.2 实例：碎纸机的尺寸优化　143
4.3 实例：飞机翼肋的自由尺寸优化　152
4.4 实例：集成外部函数的尺寸优化　157
4.5 尺寸优化卡片　162
4.5.1 DESVAR 卡片　162
4.5.2 DDVAL 卡片　163
4.5.3 DVPREL1 卡片　164
4.5.4 DVPREL2 卡片　166
4.5.5 DEQATN 卡片　168
4.6 小结　169

第 5 章　形状优化技术　170

5.1 实例：考虑结构屈曲的钢轨形状优化　171
5.2 实例：带制造工艺约束的自由形状优化　177
5.3 实例：基于全局搜索算法的筋条形状优化　183
5.4 形状优化卡片　186
5.4.1 DSHAPE 卡片　186
5.4.2 DVGRID 卡片　189
5.5 小结　190

第 6 章　复合材料优化技术　191

6.1 HyperWorks 复合材料仿真解决方案　192
6.1.1 复合材料建模技术　192
6.1.2 复合材料分析求解技术　193
6.1.3 复合材料结构优化和减重技术　194
6.2 实例：复合材料自行车车架优化　194
6.3 实例：飞机水平尾翼优化　202
6.4 小结　222

第 7 章 等效静态载荷法 223

7.1 等效静态载荷法简介 224
7.2 利用等效静态载荷进行结构动态优化 225
7.3 实例：四连杆机构的形状优化 226
7.4 实例：挖掘机工作臂的拓扑优化 235
7.5 小结 241

第 8 章 热、疲劳及非线性优化实例 242

8.1 实例：电子器件的热传导优化 243
8.2 实例：连杆的疲劳特性优化 247
8.3 实例：保险杠的碰撞性能优化 259
8.4 小结 270

第 9 章 航空行业优化实例 271

9.1 实例：舱门连接铰链拓扑优化 272
9.2 实例：舱门横梁拓扑优化与尺寸优化 284
9.3 实例：舱门横梁自由尺寸优化与尺寸优化 295
9.4 实例：机身整体结构尺寸优化 304
9.5 小结 321

第 10 章 航天行业优化实例 322

10.1 实例：导弹结构的自由形状优化 323
10.2 实例：卫星盖板的形貌优化 330
10.3 小结 335

第 11 章 HyperStudy 简介 336

11.1 试验设计 337
11.1.1 试验设计之目的 337
11.1.2 HyperStudy 试验设计类型 337
11.1.3 全因子设计 337
11.1.4 部分因子设计 339
11.1.5 中心复合设计（CCD） 339
11.1.6 Box-Behnken 设计 340
11.1.7 Plackett-Burman 设计 340
11.1.8 拉丁超立方采样 340
11.1.9 哈默斯雷采样 341

11.1.10 用户自定义设计（User Define）……341
11.1.11 设计矩阵（Run Matrix）……342
11.1.12 试验设计后处理……342

11.2 近似模型……343
11.2.1 最小二乘法（LSR）……344
11.2.2 移动最小二乘法（MLSM）……345
11.2.3 HyperKriging……348
11.2.4 数据统计分析……349

11.3 优化方法……350
11.3.1 自适应响应面法（ARSM）……351
11.3.2 可行方向法（MFD）……352
11.3.3 序列二次规划（SQP）……353
11.3.4 遗传算法（GA）……353
11.3.5 基于可靠性评估的序列优化方法（SORA）……355
11.3.6 基于 ARSM 的 SORA……355
11.3.7 多目标遗传算法（MOGA）……355
11.3.8 基于梯度的多目标优化方法（GMMO）……356

11.4 随机性研究……356
11.4.1 为什么需要随机性研究……356
11.4.2 统计分布……356
11.4.3 采样……358
11.4.4 相关性……359
11.4.5 后处理数据分析……359

11.5 小结……362

第 12 章 HyperStudy 基础练习 363

12.1 实例：基于 Templex 的优化分析……364
12.2 实例：基于 Templex 的 DOE 分析……366
12.3 实例：通过参数化 Bulk 文件进行尺寸优化……369
12.4 实例：通过 HyperMesh 进入尺寸优化……374
12.5 实例：通过参数化 Block 文件进行尺寸优化……378
12.6 实例：碰撞分析的可靠性优化……385
12.7 实例：多学科优化研究……387
12.8 小结……393

第 13 章 HyperMath 集成优化技术实例 394

13.1 实例：在 HyperStudy 中调用 HyperMath 求解器进行优化……395
13.2 实例：在 HyperStudy 中注册 HyperMath 函数进行优化……399
13.3 小结……402

第 14 章 Excel 集成优化技术实例 403

14.1 实例：提取 Excel 表格数据进行研究……404
14.2 实例：关联 Excel 表格数据进行优化设计……407

14.3 实例：基于 Excel 表格进行多目标优化 ···· 412
14.4 实例：起落架支撑梁的尺寸优化 ···· 414
14.5 小结 ···· 417

第 15 章 RADIOSS 集成优化技术实例 418

15.1 实例：撞击分析的优化设计 ···· 419
15.2 实例：材料模型参数标定 ···· 432
15.3 实例：多目标形状优化 ···· 439
15.4 小结 ···· 448

第 16 章 MotionSolve 集成优化实例 449

16.1 实例：车辆悬架的试验设计 ···· 450
16.2 实例：车辆悬架的优化分析 ···· 458
16.3 小结 ···· 461

第 17 章 HyperForm 集成优化实例 462

17.1 实例：基于 HyperMesh 界面的冲压零件形状优化 ···· 463
17.2 实例：基于 HyperForm 界面的冲压零件形状优化 ···· 468
17.3 实例：冲压零件的工艺和形状优化 ···· 472
17.4 小结 ···· 476

第 18 章 其他求解器集成优化实例 477

18.1 实例：集成 LS-Dyna 的尺寸优化 ···· 478
18.2 实例：集成 ANSYS 的形状优化 ···· 484
18.3 实例：集成 Abaqus 的形状优化 ···· 489
18.4 实例：集成 Madymo 的 DOE 分析 ···· 494
18.5 实例：集成 FLUENT 的 DOE 分析和优化研究 ···· 502
18.6 实例：集成 AcuSolve 的 DOE 分析 ···· 516
18.7 小结 ···· 524

第 1 章



OptiStruct 概述

结构优化技术是当前 CAE 技术发展的一个热点，在学术研究领域，变密度法、均匀化法、水平集法以及各种准则法等百家争鸣。相关商业软件的开发速度也很快，除了 Altair OptiStruct 外，市场上较知名的软件还有德国 FE-DESIGN 公司的 Tosca、日本 Quint 公司的 OptiShape 以及美国 MSC 公司的 Nastran 等。

结构优化技术在工业界的应用也逐渐成熟。从行业角度来讲，从早期的汽车零部件轻量化设计和飞机机身机翼的板、杆、梁及蒙皮尺寸优化，迅速发展到汽车、飞机和船舶的结构布局优化，电子产品的结构件及连接优化，建筑物和土木工程的结构布置等。从性能角度来讲，早期主要是考虑金属零部件的线性静态和模态性能指标，如应力、应变、位移、频率等，现在已经拓展到金属和复合材料零部件的振动噪声性能、碰撞安全性能、疲劳性能、动态激励下的性能指标等。

本章重点知识

1.1 Altair 公司简介
1.2 OptiStruct 优化流程和理论
1.3 性能响应
1.4 OptiStruct 优化卡片和参数
1.5 操作系统平台及性能
1.6 OptiStruct 运行参数设置
1.7 小结

1.1 Altair 公司简介

OptiStruct 是美国 Altair 公司的旗舰产品。Altair 公司是世界领先的工程设计技术的开发者之一，也是一家具有全球深厚工程技术底蕴的优秀 CAE 工程公司。Altair 公司拥有多元化的业务主线，其技术涵盖高端 CAE 仿真和优化技术、数据管理及流程自动化、高性能计算与网络计算技术，同时具备一流的产品设计、流程定制、二次开发等咨询服务能力。Altair 公司的主要软件产品线有以下几类。

➢ HyperWorks 是较为完整的 CAE 建模、可视化、有限元分析、结构优化和过程自动化等领域的软件产品，始终站在技术的最前沿，为全球的客户提供先进的产品工程方案，引领着工程技术的世界潮流，其涵盖丰富的产品模块如下。
  - ✓ HyperMesh：是目前顶级的 CAE 前处理工具之一，可以快速建立高质量的 CAE 分析模型。
  - ✓ Hyperview：是目前图形驱动速度较快的 CAE 仿真和试验数据的后处理可视化环境。
  - ✓ HyperCrash：是碰撞安全性分析的 CAE 前处理工具。
  - ✓ HyperGraph 2D/HyperGraph 3D：是海量仿真或试验数据处理工具。
  - ✓ OptiStruct：是一个面向产品设计、分析和优化的有限元和结构优化求解器，拥有全球先进的优化技术，提供全面的优化方法。
  - ✓ HyperStudy：是一个开放的多学科优化平台，以其强大的优化引擎调用各类求解器，实现多参数、多学科全面优化。
  - ✓ RADIOSS：是快速、精确和稳健的有限元结构分析软件，能够进行多种线性和非线性分析，广泛用于汽车，航空航天等机械设计领域。
  - ✓ AcuSolve：是领先的、通用的、基于有限元的计算流体动力学软件。AcuSolve 无需求解过程的迭代，也不用担心网格质量和拓扑关系，可以快速得到高质量仿真结果。流固耦合功能可以提供有效的复杂问题多物理场分析能力。
  - ✓ MotionView：是通用的机械系统仿真前后处理软件，同时也是图形可视化工具，它拥有业界领先的柔体技术。
  - ✓ MotionSolve：是多体机械系统动态运动求解器，它支持运动学求解、静力求解、准静态求解、结构动力求解、线性化、特征值分析和状态矩阵输出。
  - ✓ HyperForm：是金属钣金冲压成型和液压成型的仿真工具。
  - ✓ HyperXtrude：是一款三维金属挤压成型仿真软件。
  - ✓ SolidThinking：是工业设计三维造型解决方案。它拥有自由三维建模功能、完整历史进程、可视化界面及快速的实时渲染功能，应用于建筑、汽车、电子设备、珠宝、产品包装及游艇等多种领域，能帮助设计师轻松、快速、低成本地发明、探讨和评估新的设计想法。
  - ✓ Inspired：利用物理学原理，模拟自然规律和过程，获得基于特定环境而形成的形态与结构，能帮助设计师和建筑师进一步激发创意，完成同时满足结构与美学需求的设计。

- Altair 企业级解决方案。
  - ✓ HyperWorks Enterprise（HWE）：产品性能数据管理，通过 HWE 系统的实施，建立一个以数据管理为中心的综合系统。它可以实现企业仿真资源的管理，包括模型资源、流程模板资源；实现数据权限分级管理，数据使用的时间监控，企业的知识管理，分析项目管理。通过数据管理系统和应用软件、流程自动化软件的集成，实现数据的无缝流转。
  - ✓ Process Manager（PM）：是一个流程自动化工具的开发平台。该平台具有 HWE 数据管理系统进行无缝接口的能力。PM 将使用各种 CAX 的 API 与设计及分析 CAX 软件进行集成，设计及分析所需要及产生的数据将由 ADM 系统提供和存储。
  - ✓ PBSWorks：是全球市场占有率最大的高性能网格计算和资源管理平台，帮助制造业用户在实现 CAE 仿真的同时，按照需求有效管理和利用企业的计算资源及网络环境。

1.2 OptiStruct 优化流程和理论

OptiStruct 是一款功能强大的结构优化软件，覆盖金属和复合材料，静态和动态，线性和非线性优化应用领域，支持全面的优化类型，包括概念设计阶段的拓扑优化、形貌优化和自由尺寸优化，以及详细设计阶段的尺寸优化、形状优化和自由形状优化，如表 1-1 所示。

表 1-1 OptiStruct 结构优化类型

优 化 类 型	说 明	示 例
拓扑优化（Topology Optimization）	在给定的设计空间内找到最优的材料分布	
形貌优化（Topography Optimization）	在钣金件上找出最佳的加强筋位置和形状	
自由尺寸优化（Free Sizing Optimization）	找出板壳结构上每个区域（单元）的最佳厚度，可用于最新的复合材料优化	
尺寸优化（Size Optimization）	尺寸和参数优化，如优化梁的截面尺寸等	
形状优化（Shape Optimization）	直接基于有限元网格优化产品的位置和几何形状	
自由形状优化（Free Shape Optimization）	自动确定选定区域的最佳结构形状	

1.2.1 内部优化流程

优化设计有三要素，即设计变量、目标函数和约束条件。设计变量是发生改变从而提高性能的一组参数；目标函数要求最优的设计性能，是关于设计变量的函数；约束条件是对设计的限制，是对设计变量和其他性能的要求。

优化数学模型可表述为

$$\text{Minimize: } f(X)=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)$$
$$\text{Subjectto: } g(X)\leqslant 0 \quad j=1,\cdots,m$$
$$h_k(X)\leqslant 0 \quad k=1,\cdots,m_h$$
$$X_i^L\leqslant X_i\leqslant X_i^U \quad i=1,\cdots,n$$

其中，$X=(x_1,x_2,\ldots,x_n)$是设计变量，如产品的结构尺寸等；$f(X)$是设计目标，如各种力学性能或者重量；$g(X)$和 $h(X)$是需要进行约束的设计响应，如对产品工作时的变形和应力水平进行约束。

OptiStruct 采用数学规划方法，通过求解灵敏度构造近似显式模型，采用小步长迭代找到最优解，是目前工程上高效、稳健的优化方法，可以求解包含上百万变量或约束的优化问题，其内部优化流程如图 1-1 所示。

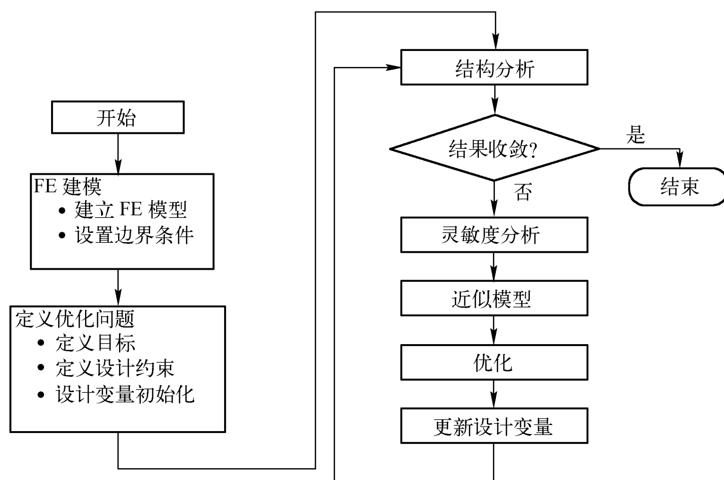


图 1-1　OptiStruct 内部优化流程

1.2.2 灵敏度分析

设计灵敏度就是设计响应对优化变量的偏导数。对于有限元方程

$$|K|\{U\}=\{P\}$$

两边对设计变量 X 求偏导数

$$\frac{\partial[K]}{\partial X}\{U\}+[K]\frac{\partial[U]}{\partial X}=\frac{\partial\{P\}}{\partial X}$$

则对位移向量 U 的偏导数为

$$\frac{\partial[U]}{\partial X}=[K]^{-1}\left(\frac{\partial\{P\}}{\partial X}-\frac{\partial[K]}{\partial X}\{U\}\right)$$

一般来说，设计响应是位移向量 U 的函数

$$g=\{Q\}^{\mathrm{T}}\{U\}$$

所以设计响应对设计变量的偏导数为

$$\frac{\partial g}{\partial X}=\frac{\partial Q^{\mathrm{T}}}{\partial X}\{U\}+Q^{\mathrm{T}}\frac{\partial\{U\}}{\partial X}$$

如果直接采用上述方法求解，称做直接法。直接法适合于设计约束很多而设计变量较少的优化问题，如形状优化和尺寸优化的灵敏度求解。对于设计约束较少而设计变量很多的优化问题，如拓扑优化和形貌优化，在计算灵敏度时可以引入伴随变量 E。伴随变量 E 满足

$$[K]\{E\}=\{Q\}$$

从而

$$\frac{\partial g}{\partial X}=\frac{\partial Q^{\mathrm{T}}}{\partial X}\{U\}+\{E\}^{\mathrm{T}}\left(\frac{\partial\{P\}}{\partial X}-\frac{\partial[K]}{\partial X}\{U\}\right)$$

这种方法叫做伴随变量法。

1.2.3 近似模型拟合

直接对有限元模型进行优化在每个迭代步将需要多次有限元求解，工作量很大，同时有限元模型是隐式的，必须进行显式近似从而建立显式近似模型，方便进行后续优化。

利用灵敏度信息对设计响应进行展开，从而得到显式近似模型，有以下几种近似方法。

线性近似：

$$\tilde{g}_j(X)=g_{j0}-\sum_{i=1}^{N}\frac{\partial g_j}{\partial X_i}(X_i-X_{i0})$$

倒近似：

$$\tilde{g}_j(X)=g_{j0}-\sum_{i=1}^{N}\frac{\partial g_j}{\partial X_i}X_{i0}^2\left(\frac{1}{X_i}-\frac{1}{X_{i0}}\right)$$

凸近似：

$$\tilde{g}_j(X)=g_{j0}+\sum_{i=1}^{N}\frac{\partial g_j}{\partial X_i}c_{ji}(X_i-X_{i0})$$

其中，

$$c_{ji}=1 \quad 当 \quad \frac{\partial g_j}{\partial X_i}\geqslant 0,\quad c_{ji}=\frac{X_{i0}}{X_i} \quad 当 \quad \frac{\partial g_j}{\partial X_i}<0$$

OptiStruct 自动选择近似方法进行优化模型的显式近似。

1.2.4 寻优策略

带约束的优化问题在最优点处必须满足 Kuhn-Tucker 条件（K-T 条件），即对于优化问题，即

目标函数: min$f$（X）

约束条件: g_j（X）⩽0

引入拉格朗日乘子

$$L(X,\mu)=f(X)+\mu^{\mathrm{T}}g=f(X)+\sum\mu_j g_j$$

拉格朗日方程最小化的条件是

$$\nabla_x L(X)=\nabla_x f(X)+\sum\mu_j\nabla_x g_j=0$$

$$\left.\begin{aligned}&\nabla_\mu L(\mu)=g=0\\&\mu_j^{\mathrm{T}}g_j=0\\&\mu_j\geqslant 0\end{aligned}\right\}$$

OptiStruct 可以采用直接法和对偶法两大类方法来进行寻优，根据具体问题自动选择适当的数学规划方法（如 COLIN 方法）加以求解，不同于传统的优化准则法。

1.2.5 收敛准则

当连续两次迭代的目标值相差小于给定收敛容差时，优化问题求解收敛。OptiStruct 默认的收敛容差是 0.5%。用户可以根据具体优化问题自定义不同的收敛容差。

此外，用户可以通过控制最大迭代次数来强制优化问题结束。例如，当最大迭代次数为 30 步，此时不论目标函数是否收敛，优化迭代都将结束，用户可以通过 out 文件查看优化结果。

1.2.6 全局搜索功能

求解优化问题后，常见的一个讨论是所得到的解是局部最优解还是全局最优解。基于局部近似的算法（如梯度优化算法）更易于找到一个局部最优解，而全局近似算法（如响应面算法）和全局探索算法（如遗传算法）则更有可能找到局部最优解之外的解，也就是说，全局类算法提高了找到全局最优解的机会。可是没有算法可以保证其最优解是真正的全局最优解，除非该优化问题为凸问题。所谓凸优化问题，其目标函数和可行区域需要是凸的，可惜实际中大多数工程问题并非凸问题。因此，对于实际问题，全局最优解仍然难以找到。不同的算法只是改变找到全局最优解的机会，但无法确保找到。此外，值得注意的是，任何提高找到全局最优解机会的算法都会增加计算成本，而且通常是大大增加。

图 1-2 描述了凸问题的概念。凸优化问题只有一个最小值（或最大值），这个最小值（图中 A 点）即是全局最小值。

用基于梯度的算法求解非凸优化问题时，结果依赖于起始点，这类算法更易于找到局部

最优解。OptiStruct 11.0 在梯度算法的基础上开发了新的全局搜索算法，称为“多起点优化”。该算法通过从多个起点执行优化，广泛地在设计空间中探索最优解，有效地提高了找到全局最优解的可能性。由于优化结果依赖于起始点，n 个不同的起始点可能找到 n 个不同的优化结果。当然不同的起始点也有可能找到同一个最优解，但是这不意味着所找到的最优解一定是全局最优解，如图 1-3 所示。

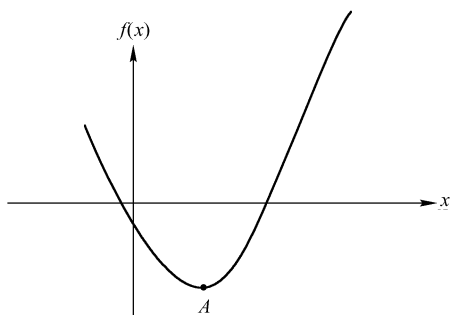


图 1-2　凸函数, $f(x)$

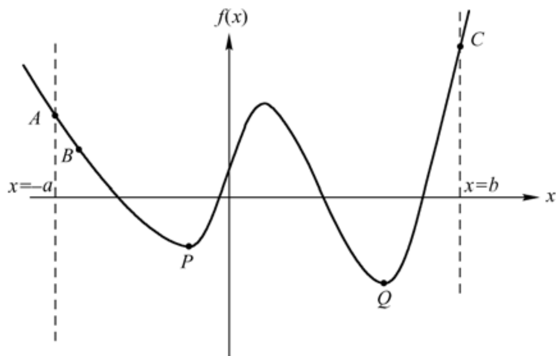


图 1-3　非凸函数, $f(x)$

考虑非凸函数 $f(x)$，定义域为 $-a \leqslant x \leqslant b$。如果从 A 点开始优化，最优解将是 P 点。从 B 点开始优化，最优解同样是 P 点。而如果从 C 点开始优化，最优解将是 Q 点。由此可以看出，多起点优化算法并不能保证找到全局最优解（当然其他任何算法也是如此），但是它可以提高找到全局最优解的可能性。

OptiStruct 11.0 里全局搜索优化（Global Search Option，GSO）支持上述算法。全局搜索优化通过输入文件中 I/O 块里的 DGLOBAL 选项设置，相应的参数通过 BULK DATA 中的 DGLOBAL 卡片定义。

1.2.7　约束屏蔽

在优化过程的每次迭代中，目标函数被重新计算，所有的约束条件也被加以判定。保留优化问题的所有响应可能造成以下两方面的问题：

- 优化问题有非常多的响应和设计变量。多数的优化算法可以处理大量响应或大量设计变量的问题，但是无法求解这两者数量都很多的情况。
- 对于基于梯度的优化来说，这些响应的设计灵敏度都需要计算。当响应和设计变量的数量都很多时，设计灵敏度的计算开销（时间和空间上的）也会变得很大。

约束屏蔽（constraint screening）把优化问题中的响应数量缩减到具有代表性的少数，被保留的响应抓住了原始优化问题的本质，同时又使得问题的计算规模在一个可接受的范围内。约束屏蔽应用了这样一个事实，即被屏蔽掉的约束不会影响优化的方向，因此它们可以从当前的设计迭代步中去除。被屏蔽掉的约束响应要么在可行域内远离边界值，要么比保留下来的指定数量的约束（相同约束响应类型，同一设计域，同一工况）相对重要性低（比如对上限约束该响应的值更小，或对下限约束该响应的值更大）。

考虑这样一个优化问题，目标是最小化模型总质量（该模型由 100 000 个单元组成），同时保证所有单元的应力低于其材料的屈服应力。在这个问题中，每个子工况有 100 000 个约束（每个单元的应力低于其材料的屈服应力）。对于每个设计变量，在每一子工况的每次迭代中都要进行 100 000 个灵敏度的计算。

因为设计变量的改变也会受到运动极限的限制，所以应力值在相邻的迭代步之间不会发生剧烈变化。因此，也就没有必要计算那些应力远低于其屈服应力的单元的灵敏度。同样的，优化的方向主要受到最大单元应力的影响，因此可以仅仅考虑那些最大单元应力，这样需要进行的灵敏度计算的数量将会进一步降低。

当然，约束屏蔽是一个权衡利弊的过程。屏蔽掉一些约束响应后，有可能需要更多的迭代才能得到一个收敛的解。尤其是如果屏蔽了过多的约束响应，可能会耗费非常长的时间才能收敛。在最坏的情况下，如果保留的响应数量少于有效的约束数量，优化甚至可能不收敛。

大量的测试表明，对于大多数优化问题，使用约束屏蔽可以节省很多的计算时间和资源。因此，在 OptiStruct 中约束屏蔽默认是激活的。默认设置为，对于每种响应类型在每个设计区域和子工况中，仅考虑在可行域内离其边界值 50%以内（包括不可行域）的前 20 个最重要（比如对于上限约束值最大，或对于下限约束值最小）的约束。

DSCREEN 卡片可以控制约束屏蔽的阈值和保留的约束数量。对于所有的 DRESP1 类型响应，可以单独设置不同的 DSCREEN。对于 DRESP2 类型的响应，需要单一的 DSCREEN 设置，其 RTYPE 值为 EQUA。同样的，对于 DRESP3 类型的响应，需要单一的 DSCREEN 设置，其 RTYPE 值为 EXTERNAL。在定义 DRESP2 和 DRESP3 类型的响应时，保证相同域编号的响应使用相似的方程，这一点很重要（为了保证约束屏蔽的执行效率，相同域内的响应在数量级上应该相差不大，并且表现出相似的设计灵敏度。要保证这一点，最简单的方法就是组合相似的变量）。

为了减轻用户的负担，约束屏蔽的准则可以自动执行并在优化过程中自适应地调整，在尽可能地保留最少数量响应的同时达到稳定收敛。在 DSCREEN 卡片中设置 RTYPE=AUTO 可以打开这一功能。在这一设定下，域将会自动定义。这个功能对于经验较少的用户来说非常有用，当问题中存在许多局部约束时也非常有价值。但是，它在运行过程中将会消耗较多的内存。高级用户可以通过自定义约束屏蔽准则，手动定义保留的约束，这样会使用较少的内存，这对于大规模问题来很有价值（即使可能会影响收敛的稳定性和解的最优性）。

1.2.8 域及其作用

在 OptiStruct 中，一个域是指一组相同类型的响应。

通过在定义响应的 DRESP1、DRESP2 和 DRESP3 卡片中指定域编号来定义域。如果不设置域编号或者设置为 0，与响应关联的每一种属性（property）都将生成它自己的一个域。对于不同类型的响应可以使用相同的域编号，但是由于它们类型不同，所以不会生成同一个域。

➢ 示例 1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DRESP1	1	label	STRESS	PSHELL		SMP1		1	
	2	3							

对于使用 1，2，3 号 PSHELL 属性的单元，编号为 1 的 DRESP1 卡片定义了所有这些单元的应力作为响应。由于没有指定域编号，每个 PSHELL 属性的单元应力响应都会形成一个域。因此，所有属性为 1 号 PSHELL 的单元应力响应和所有属性为 2 号 PSHELL 的单元应力响应在不同的域中。同样它们与所有属性为 3 号 PSHELL 的单元应力响应也在不同的域中。如果在一个优化问题中使用这样的响应的定义，并且使用默认的约束屏蔽设置，那么对应于这 3 种 PSHELL 属性，各有 20 个单元应力在计算中被重点关注。也就是说，每个域中有 20 个，总共有 60 个单元应力响应被保留。

➢ 示例 2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DRESP1	2	label	STRESS	PSHELL	1	SMP1		1	
	2								
DRESP1	3	label	STRESS	PSHELL	1	SMP1		3	

上面的 DRESP1 卡片中定义的所有应力响应形成了一个域，注意 field(6)中的值为非零（0 等效于将该域设置为空）。如果在优化问题中使用这些响应定义卡片（具有相同的类型（STRESS），在 field(6)中有相同的非零值），假定使用默认的约束屏蔽设置，那么在所有这 3 种 PSHELL 属性的单元中，总共有 20 个单元应力响应被保留，因为它们共同形成了一个域。

1.3 性能响应

在结构优化中，OptiStruct 可以使用有限元分析中的多种结构响应或者这些响应的组合来定义目标函数和约束函数。OptiStruct 支持如图 1-4 所示的各类响应类型及其组合。

mass	inertia	static force	composite strain	frf stress
massfrac	compliance	static stress	frf acceleration	frf strain
volume	frequency	static strain	frf displacement	frf velocity
volumefrac	buckling	composite failure	frf force	fatigue
cog	static displacement	composite stress	frf pressure	function

beadfrac	psd accleration	psd velocity	rms strain
compliance index	psd displacement	rms accleration	rms velocity
weighted comp	psd pressure	rms displacement	
weighted freq	psd stress	rms pressure	
temperature	psd strain	rms stress	

图 1-4 OptiStruct 支持的响应类型

响应通过模型响应 DRESP1、函数响应 DRESP2 或外部响应 DRESP3 卡片定义。DRESP2 卡片需要引用 DEQATN 卡片定义的方程，而 DRESP3 卡片则要使用 LOADLIB I/O 选项标明的用户定义的外部程序。响应可以是全局响应，也可以是与子工况（荷载步、载荷工况）相关的响应。响应的特征决定了引用这个响应的约束或目标函数在子工况中是否被引用。

1.3.1 模型响应

模型响应是直接将有限元模型的计算结果（性能）或者其他信息作为优化的响应。模型响应可以直接在 HyperMesh 用户界面中建立，在求解文件中表示为 DRESP1 卡片。

1．质量和体积

质量和体积都是全局响应，可以对整个结构、单个属性（部件）或某种材料定义，也可对一组属性（部件）或材料来定义。

在拓扑优化中，不推荐使用质量或体积作为约束条件或目标函数，因为它们对于设计的改变都不敏感。

要约束一个包含多种属性（部件）区域的质量或体积，可以使用 SUM 函数去计算这些属性（部件）的质量或体积和，也可以使用 DRESP2 卡片定义方程来计算这些属性（部件）的质量或体积和，否则，质量或体积约束将被认为分别施加在区域内的每一种属性（部件）上。为了避免这个问题，可以设置这些属性使用相同的材料，并将质量或体积约束应用于这种材料上。

2．质量分数和设计区域的体积分数

质量分数和体积分数都是全局响应，其取值范围为 0.0～1.0。它们表示了拓扑优化相对于初始设计空间的分数，可以对整个结构、单个属性（部件）或某种材料定义，也可对一组属性或材料来定义。

质量分数和体积分数的区别是：质量分数计算时包括非设计区域的质量，而体积分数则仅考虑设计区域的体积。

体积分数的计算公式为

体积分数=（当前迭代步总体积–初始非设计区域体积）/初始设计区域体积

质量分数的计算公式为

质量分数=当前迭代步总质量/初始总质量

如果除了拓扑优化外还要进行尺寸优化和形状优化，体积分数计算中所用到的值（初始设计区域体积）不会因为尺寸和形状的改变而发生变化（这在某些情况下可能会使体积分数出现负值）。因此，如果要进行尺寸优化和形状优化，推荐使用体积响应，而不使用体积分数响应。

要约束一个包含多种属性（部件）的区域的体积分数或质量分数，应该使用 DRESP2 卡片定义方程来计算这些属性（部件）的体积（或质量）和，否则，体积分数或质量分数约束将被认为分别施加在这一区域内的每一种属性（部件）上。为了避免这个问题，可以设置这些属性使用相同的材料并将体积分数或质量分数约束应用于这种材料上。

3．重心

重心是一个全局响应，既可以对整个结构、单个属性（部件）或某种材料定义，也可对一组属性（部件）或材料定义。

4．惯性矩

惯性矩是一个全局响应，既可以对整个结构、单个属性（部件）或某种材料定义，也可

对一组属性（部件）或材料来定义。

5．加权柔度

加权柔度是在典型的拓扑优化问题中使用的一种考虑多个子工况（荷载步、荷载工况）的方法。这个响应就是每一子工况（荷载步、荷载工况）的柔度的加权和，即

$$C_W = \sum W_i C_i = 1/2 \sum W_i u_i^{\mathrm{T}} f_i$$

这是一个定义在整个结构上的全局响应。

6．加权特征值倒数（频率）

加权特征值倒数是在典型的拓扑优化问题中使用的一种考虑多个频率的方法。这个响应就是优化中关心的各个模态的特征值倒数的加权和，即

$$f_W = \sum W_i / \lambda_i with[K - \lambda_i M]u_i = 0$$

通过计算公式可以发现，提高低阶模态的频率对目标函数产生的影响比增加高阶模态的频率对目标函数产生的影响要大。如果所有模态的频率简单相加，OptiStruct 将会在提高高阶模态的频率上使用更多的资源。这是一个定义在整个结构上的全局响应。

7．组合柔度指数

组合柔度指数是在典型的拓扑优化问题中使用的一种考虑多个频率和静态子工况（荷载步、荷载工况）组合的方法。该指数定义为

$$S = \sum W_i C_i + NORM \frac{\sum W_i / \lambda_i}{\sum W_i}$$

它是一个定义在整个结构上的全局响应。

标准化系数（NORM）用来对柔度和特征值对指数的贡献进行标准化。典型的结构柔度在 1.0e4～1.0e6，而典型的特征值倒数的数量级在 1.0e-5 左右。如果不使用标准化系数（NORM），线性静态柔度将决定优化结果。

NORM 的数值通常可用以下公式计算：

$$NF = C_{\max} \lambda_{\min}$$

式中：$C_{\max}$ 是在所有子工况（荷载步、荷载工况）中最大的柔度值；$\lambda_{\min}$ 是组合柔度指数计算中得到的最小的特征值。

对于全新的优化问题，用户可能无法估算 NORM 的值。OptiStruct 将根据第一个迭代步的柔度和特征值自动计算 NORM 的值。

8．拓扑优化或自由尺寸优化中的 von Mises 应力

在拓扑优化或自由尺寸优化中，von Mises 应力约束可以通过 DTPL 或 DSIZE 卡片扩展行中的 STRESS 选项来定义。但是有如下的限制。

只能定义一个 von Mises 许用应力约束。当对不同材料定义不同的许用应力时，将会出现拓扑奇异解现象。拓扑奇异解源于应力约束的条件性，即应力约束会随着单元的消失而消失。这也带来另外一个问题，即很多优化问题的最优解存在于缩减后的设计空间中，而在原设计空间中使用基于梯度的优化器常常无法找到最优解。

不允许单独为某一区域指定应力约束。因为优化过程中这些区域可能消除，从而导致所

有的应力约束消失，这会造成病态的优化问题。应力约束应该应用于整个模型，包括设计区域和非设计区域，并且必须在所有的 DSIZE 和 DTPL 卡片中标识出来。

OptiStruct 可以自动识别在点荷载或点边界附近的假应力集中现象。由于几何边界造成的应力集中也可以被过滤，因为这种应力集中往往可以利用局部形状优化得以改善。

由于大量单元的应力约束被激活，在.out 文件中将不会给出单元应力的信息。关于单元应力的迭代历史可以在 HyperView 或 HyperMesh 中查看。

应力约束不能作用于 1-D 单元。

当模型中有强制位移中，不能使用应力约束。

9．筋的离散系数

筋的离散系数是形貌设计区域的全局响应。它反映了一个或多个形貌设计区域形状改变的数量。其变化范围为 0.0～1.0（0.0 < BEADFRAC≤1.0），其中 0.0 表示没有形状发生变化，1.0 则表示整个设计区域形状发生了所允许的最大变化。

1.3.2 子工况相关的响应

1．静态柔度

柔度 C 可以由以下关系得到

$$C = 1/2u^{\mathrm{T}} f \quad 其中，Ku = f$$

或

$$C = 1/2u^{\mathrm{T}} Ku = 1/w \int \varepsilon^{\mathrm{T}} \sigma \mathrm{d}v$$

柔度是结构的应变能，可以认为是结构刚度的倒数。它既可以对整个结构、单个属性（部件）或某种材料定义，也可对一组属性（部件）或材料来定义。柔度必须指定与一个线性静态子工况（荷载步、荷载工况）相关。

要约束一个包含多种属性（部件）的区域的柔度，可以使用 SUM 函数去计算这些属性（部件）的柔度，也可以使用 DRESP2 卡片定义方程来计算这些属性（部件）的柔度，否则，柔度约束将被认为分别施加在这一区域内的每一种属性（部件）上。为了避免这个问题，可以设置这些属性使用相同的材料并将柔度约束应用于这种材料上。

2．静态位移

静态位移是线性静态分析的结果。节点位移分量或绝对值都可以作为响应。它们必须指定与一个线性静态子工况（荷载步、荷载工况）相关。

3．均匀材料的静态应力

部件、属性或单元的不同类型的应力都可以被定义为响应。使用单元应力，约束屏蔽将会执行。不能对拓扑设计空间定义静态应力约束。这个响应与子工况（荷载步、荷载工况）相关。

4．均匀材料的静态应变

部件、属性或单元的不同类型的应变都可以被定义为响应。使用单元应变，约束屏蔽将会执

行。不能对拓扑设计空间定义静态应变约束。这个响应与子工况（荷载步、荷载工况）相关。

5．复合材料静态应力

不同的复合应力可以被定义为响应。它既可以定义在 PCOMP(G)的部件或单元上，也可以定义在 PLY 类型的属性上。铺层结果被使用，约束屏蔽也会执行。同样不能对拓扑设计空间定义复合应力约束。这个响应与子工况（荷载步、荷载工况）相关。

6．复合材料静态应变

不同的复合应变可以被定义为响应。它既可以定义在 PCOMP(G)的部件或单元上，也可以定义在 PLY 类型的属性上。铺层结果被使用，约束屏蔽也会执行。同样不能对拓扑设计空间定义复合应变约束。这个响应与子工况（荷载步、荷载工况）相关。

7．复合材料静态失效准则

不同类型的复合材料失效准则可以定义为响应。它既可以定义在 PCOMP(G)的部件或单元上，也可以定义在 Ply 类型的属性上。铺层结果被使用，约束屏蔽也会执行。同样不能对拓扑设计空间定义复合应变约束。这个响应与线性静态子工况（荷载步、荷载工况）相关。

8．静力

不同类型的力可以定义为响应。用户可以对部件、属性或单元定义这个响应。约束屏蔽将会执行。不能对拓扑设计空间定义静力约束。这个响应与线性静态子工况（荷载步、荷载工况）相关。

9．温度

温度是热传导的结构，它必须指定为某个热传导子工况（荷载步、荷载工况）的响应。温度响应不能用于拓扑优化或自由尺寸优化中。

10．频率

固有频率是模态分析的结构，必须指定为某个模态分析子工况（荷载步、荷载工况）的响应。推荐同时约束前几阶模态的频率，不要仅约束第一阶频率。

11．屈曲因子

屈曲因子是屈曲分析的结构，必须指定为某个模态分析子工况（荷载步、荷载工况）的响应。典型的屈曲约束为屈曲因子≥1.0，它表示在给定荷载下结构不会发生屈曲。推荐对前几阶模态的屈曲因子进行约束，而不是仅约束第一阶模态。

12．频率响应位移

频率响应位移是频响分析的结果。节点位移，如平动、转动、法向位移，都可作为响应。用户可以选择实况、虚部或幅值、相位形式的位移矢量的分量。它们必须指定为某个频率响应子工况（荷载步、荷载工况）的响应。

13．频率响应速度

频率响应速度是频率响应的结果。节点速度，如平动、转动、法向速度，都可作为响应。用户可以选择实况、虚部或幅值、相位形式的速度矢量的分量。它们必须指定为某个频率响应子工况（荷载步、荷载工况）的响应。

14．频率响应加速度

频率响应加速度是频率响应分析的结果。节点加速度，如平动、转动、法向加速度，都可作为响应。用户可以选择实况、虚部或幅值、相位形式的加速度矢量的分量。它们必须指定为某个频率响应子工况（荷载步、荷载工况）的响应。

15．频率响应应力

不同类型的应力可以定义为频率响应应力响应。用户可以对部件、属性或单元定义这个响应。不使用实部、虚部或幅值、相位形式的单元应力，使用约束屏蔽。实体单元或壳单元的 von Mises 应力可定义为直接响应。不能对拓扑设计空间定义应力约束。这个响应与频率响应子工况（荷载步、荷载工况）相关。

16．频率响应应变

不同类型的应变可以定义为频率响应应变响应。用户可以对部件、属性或单元定义这个响应。单元应变可表示为实部、虚部或幅值、相位的形式，并使用约束屏蔽。实体单元或壳单元的 von Mises 应变可定义为直接响应。不能对拓扑设计空间定义应变约束。这个响应与频率响应子工况（荷载步、荷载工况）相关。

17．频率响应力

不同类型的力可以定义为频率响应力，可以对部件、属性或单元定义，采用实部、虚部或幅值、相位形式，使用约束屏蔽。不能对拓扑设计空间定义频率响应力约束。这个响应与频率响应子工况（荷载步、荷载工况）相关。

18．PSD（功率谱密度）和 RMS（均方根）响应

PSD 位移、PSD 速度、PSD 加速度、PSD 声压、PSD 应力、PSD 应变、RMS 位移、RMS 速度、RMS 加速度、RMS 声压、RMS 应力和 RMS 应变，都可定义为响应。

19．声压

声压是频率响应分析与流体-结构模型耦合分析的结果。用户可定义在流体节点上，必须指定为某一流体-结构与频率响应分析耦合分析子工况（荷载步、荷载工况）的响应。

20．柔性体响应

对于多体动力学问题来说，一个或多个柔性体的质量、重心和惯性矩都可以作为响应。这些是一般的结构响应之外的响应。

21．MBD 位移

MBD 位移是多体动力学分析的结果。它必须指定为某一多体动力学工况（荷载步、荷载工况）的响应。

22．MBD 速度

MBD 速度是多体动力学分析的结果。它必须指定为某一多体动力学工况（荷载步、荷载工况）的响应。

23．MBD 加速度

MBD 加速度是多体动力学分析的结果。它必须指定为某一多体动力学工况（荷载步、荷载工况）的响应。

24．MBD 力

MBD 力是多体动力学分析的结果。它必须指定为某一多体动力学工况（荷载步、荷载工况）的响应。

25．MBD 表达式

MBD 表达式响应是多体动力学分析的结果。它是表达式的估值，必须指定为某一多体动力学工况（荷载步、荷载工况）的响应。

26．寿命和损伤

寿命和损伤是疲劳分析的结果，它们必须定义为某个疲劳工况的响应。

1.3.3 函数响应

函数响应是指用数学表达式将设计变量、节点位置、响应和表格等组合在一起的响应。该响应是否与子工况（荷载步、荷载工况）有关，取决于函数表达式中所涉及的响应类型。

函数响应采用 DRESP2 卡片建立。

1.3.4 外部响应

外部响应是指用用户定义的外部子程序将设计变量、节点位置、特征向量、响应和表格组合在一起的响应。该响应是否与子工况（荷载步、荷载工况）有关，取决于子程序中所涉及的响应类型。

外部响应采用 DRESP3 卡片建立。

1.4 OptiStruct 优化卡片和参数

正确理解 OptiStruct 的各种卡片和参数，是建立正确的优化模型并进行调试的关键。OptiStruct 具有大量的卡片和参数调整（一般采用默认设置已经足够了）。

DOPTPRM 参数用于对优化过程及结果进行控制，各参数具体含义如表 1-2 所示。

表 1-2 DOPTPRM 参数说明

参 数	取 值	描 述
CHECKER	<0 或 1> 默认值为 0	表示棋盘格控制选项，其值有以下两项。 参数 0：无棋盘格控制 参数 1：整体控制棋盘格 此选项用于控制棋盘格单元的分布 弊端：在稠密单元向零密度单元转换时，产生半稠密单元。用户可以通过使用最小尺寸控制（DTPL 中的 MENBSIZ 选项）卡片减少此影响。MENBSIZ 选项中已经内置棋盘格单元控制方法 若不希望结果中出现较大尺寸，可以设置 MINDIM 的值小于网格单元尺寸。最小尺寸控制采用三步迭代算法，其中最后一步主要用于消除产生的半稠密单元 若施加制造约束，建议激活最小尺寸控制，但此时三步迭代算法中的最后一步将不再消除半稠密单元，以免影响制造约束

（续）

参　　数	取　　值	描　　述
DDVOPT	< 1, 2, 3 > 默认值为 1	表示离散设置变量选项 参数 1：全离散变量优化设计 参数 2：两步算法。连续优化过程+离散优化过程（从连续优化开始计算） 参数 3：忽略 DDVAL 控制的连续优化。如果 DDVAL 中定义的约束比 DESVAR 中的约束严格，则计算时使用 DDVAL 中的约束控制
DELSHP	Real > 0.0 默认值为 0.2	表示形貌与形状优化设计变量的初始运动极限（Move Limits）。它定义为与上下限之差相乘的系数 该参数只能用于设置初始值，运动极限在优化过程中会自动调整以提高稳定性与收敛速度。后续优化迭代步中的运动极限不会超过初始值
DELSIZ	Real > 0 默认值为 0.5	表示尺寸设计变量的初始运动极限（Initial Fractional Move Limit） 该参数只能用于设置初始值，运动极限在优化过程中会自动调整以提高稳定性与收敛速度。后续优化迭代步中的运动极限不会超过初始值
DELTOP	Real > 0 默认值为 0.5	表示拓扑优化与自由尺寸优化设计变量的初始运动极限 该参数只能用于设置初始值，运动极限在优化过程中会自动调整以提高稳定性与收敛速度。后续优化迭代步中的运动极限不会超过初始值
DESMAX 或 MAXITER	Integer≥0 默认值为 30 若已定义 MINDIM，则默认值为 80	表示最大优化设计迭代次数
DISCRETE	Real≥0.0 默认值为 1.0 对已经施加尺寸控制但没有施加制造约束的体单元结构，则默认值为 2.0	表示离散度参数。在拓扑优化中，控制单元收敛到材料密度为 0 或者 1 的趋势。值越高，材料密度介于 0 与 1 之间的单元就越少。对壳单元推荐设置为 0.0～2.0，对体单元推荐设置为 0.0～3.0
DISCRT1D	Real > 0.0 默认值为 DISCRETE	表示 1-D 单元离散度参数。与 DISCRETE 控制效果类似。拓扑优化中 1D 单元通常要求比 2D 与 3D 单元有更高的离散度。
ESLMAX	Integer≥0 默认值为 30	表示多体动力学优化和非线性优化（基于等效静载法）中外部循环的最大迭代次数 若设为 0，则不启动优化过程
ESLSOPT	<0, 1> 默认值为 1	表示多体动力学优化中时间步屏蔽的方法 参数 1：屏蔽多体动力学设计中不重要的时间步 参数 0：不屏蔽任何时间步，即在优化中考虑多体动力学分析中的所有时间步 如需更多信息，请查阅等效静态荷载法的介绍（Equivalent Static Load Method，ESLM）
ESLSTOL	0.0≤Real≤1.0 默认值为 0.3	表示多体动力学优化中屏蔽时间步的容差。只有当 DOPTPRM 和 ESLSOPT 设置为 1 时是有效。 设置的值越小，设计过程中计算的时间步就越少，从而优化设计过程更快。太小的值将使得设计过程不收敛。因此，如果 ESLSTOL<10，则优化过程中 10 个主要的时间步应包含在其中。ESLSTOL=1.0 与设置 DOPTPRM 和 ESLSOPT 为 0 的效果一样，即多体动力学优化时考虑所有时间步，这会消耗更长的 CPU 时间
GBUCK	YES, NO, 1 或 0 默认值为 0	表示控制全局屈曲约束 参数 0，NO，或者忽略此选项：无全局屈曲约束 参数 1 或者 YES：激活全局屈曲约束 激活此选项时，全局屈曲约束将对包含有屈曲特征值（LAMA）约束的工况起作用。对此类工况，在此控制选项开启时，只需指定约束下限。GBUCK 参数将确保优化过程中顾忌到所有小于或等于约束下限的屈曲特征值 在任何屈曲工况中，多于 1 个屈曲约束，将会报错 DOPTPRM 中参数 MAX_BUCK 控制优化中所考虑的工况屈曲模态的最大数目，EIGRL 卡片控制每次迭代中屈曲工况下模态的计算次数

（续）

参　　数	取　　值	描　　述
MATINIT	0.0 与 1.0 之间的实数	表示初始材料填充比例 对于以质量最小为目标的拓扑优化，默认值为 0.9 有质量约束的优化，默认值取自约束值 若质量非目标，也无质量约束，默认值为 0.6
MAX_BUCK	Integer > 0 默认值为 15	表示控制优化问题中每个屈曲工况中所考虑的屈曲特征值的最大数目 仅当 GBUCK 存在时有效 每个屈曲工况中考虑的最多特征个数不超过 MAX_BUCK 若用户定的 MAX_BUCK<15，并且启用了自动约束屏蔽，MAX_BUCK 将会被重置为 15。若问题中需要考虑更多的屈曲模态，需要明确指定 MAX_BUCK（即 MAX_BUCK>15）。为减少计算时间，OptiStruct 自动动态调整每个迭代步中屈曲工况下 EIGRL 卡片所指定的特征值的上限，并且仅计算在优化问题中有可能被保留的特征值
MINDENS	Real > 0.0 默认值为 0.01	表示最小单元材料密度 设置赋给设计单元的材料密度下限。太低的值将会导致病态刚度矩阵
MINDIM	Real > 0.0 默认：无最小尺寸控制	拓扑优化结果中构件的最小直径。本参数用于消除优化结果中的小构件
MMCHECK	0,1 默认值为 0	本参数结合 MINDIM 同时使用，可以确保最终优化结果中无棋盘格 与 CHECKER=1 类似，此参数的副作用是优化结果中会包含大量的半稠密单元，因此仅当必要的时候才使用
NESLEXPD	Integer > 0 默认值为 20	本参数用于指定每个 EXPDYN（几何非线性显示动力学分析）工况中用于优化的时间步的数目 每一个时间步将会生成一个 ESL（等效静载）工况。在工况终止时间（TTERM）总会生成 ESL 参数 0：保留所有时间步。总的时间步数量取决于工况的持续时间与动画输出控制（卡片 XSTEP 中的 TA0 与 DTA） 保留较少的时间步可以节省内部循环的计算时间，但是过少的时间步将会导致更多的外部循环，甚至使得计算进程不收敛
NESLIMPD	Integer > 0 默认值为 20	本参数指定每个 IMPDYN（几何非线性隐式动力学分析）工况中用于优化的时间步的数目 每一个时间步将会生成一个 ESL（等效静载）工况。在工况终止时间（TTERM）总会生成 ESL 参数 0：保留所有时间步。总的时间步数量取决于工况的持续时间与动画输出控制（卡片 TSTEPNX 中的 TA0 与 DTA） 保留较少的时间步可以节省内部循环的计算时间，但是过少的时间步将会导致更多的外部循环，甚至使得计算进程不收敛
NESLNLGM	Integer > 0 默认值为 1	本参数指定优化问题中每个 NLGEOM（几何非线性隐式静态分析）工况输出的时间步的数目 每一个时间步将产生一个 ESL（等效静载）工况。在工况终止时间（TTERM）总会生成 ESL 参数 0：保留所有时间步。总的时间步数量取决于工况的持续时间与动画输出控制（卡片 NLPARMX 中的 TA0 与 DTA） 保留较少的时间步可以节省内部循环的计算时间，但是过少的时间步将会导致更多的外部循环，甚至使得计算进程不收敛
OBJTOL	Real >0.0 默认值 为 0.005	表示相对收敛条件 如果相邻两步迭代中目标函数的相对变化比例小于 OBJTOL，优化停止
SHAPEOPT	1, 2 默认值为 1	定义选择参数，用于选择相应的形状优化算法。本算法仅适用于非移动形状优化问题 参数 1：默认形状优化算法 参数 2：选择相应的形状优化算法 若已经指定的离散变量，则推荐本参数与 DDVOPT=2

1.5 操作系统平台及性能

OptiStruct 支持的操作系统平台如表 1-3 所示。

表 1-3 OptiStruct 支持的操作系统平台

操作系统名称	位数/bit	最低系统版本	SMP	MPP (SPMD)
Linux	32	RHEL 4 Novell SuSe 9.2	是	是
	64	for ia64 SGI ProPack 4, RHEL 4, Novell SuSe 9.2, SLES 9	是	是
		for x86_64 RedHat Enterprise Linux 4, Novell SuSe 10.2, SLES 9.1	是	是
Win XP/Vista	32	Windows XP/Vista	是*	否
Win XP/Vista	64	Windows XP/Vista x64 edition	是*	否
HP	64	HP-UX 11.11 for PA-RISC	是	否
		HP-UX 11.23 for ia64	否	否
IBM	64	AIX 5.3	是	否
SUN	64	Solaris 10 for x86_64	是	否

SMP–	对称多处理并行（多线程，共享内存）
MPP (SPMD)–	大规模并行处理（多线程，且每个线程有自己的内存）
*	SMP 并行在 Windows 平台上的性能表现一般，因此一般不推荐使用

在 32 位的操作系统中，大多数情况下，OptiStruct 可以使用不超过 2.0 GB 的内存（取决于操作系统和系统中安装的其他软件，这个数值通常会更小）。对于 32 位 Windows 操作系统，一般可使用 1.9 GB 内存。注意，使用 64 位的硬件（扩展 64 位内存 EM64T 或 64 位 CPU-AMD64）不会改变这个限定值。

在 32 位操作系统中，通过以下方法，OptiStruct 可以从 2GB 以上的物理内存中获得有限的性能提升。

- 操作系统和其他与 OptiStruct 同时运行的程序（如 HyperMesh）可以使用额外的内存。
- OptiStruct 要求它所申请的内存是连续的物理内存块。只是当它启动带宽最小化进程时，会额外请求少量内存。在 Windows 平台中，带宽最小化进程所需的额外内存可以在 2GB 的内存限制外申请，这就使得一些规模稍大的作业也可以求解。要利用这一特性，必须在 Windows 启动文件 boot.ini 中插入语句“/3GB”。这个选项在大多数版本的 Windows 2000、Windows XP（需 SP2）中有效，但并未出现在微软的官方文档中，因为在某些硬件配置下可能会造成不可预料的崩溃。总之，选项“/3GB”并没有增加可申请到的连续内存的数量，因此对于求解大规模问题帮助有限。
- 32 位的 Linux 系统是唯一支持 2GB 以上内存的 32 位系统。在目前大多数版本的 Linux 系统中，OptiStruct 最多可以申请到 4GB 的内存（如果可用）。一般来说，如果

系统内核是 2.4 或更早版本，它们不允许使用全部的 4GB 内存，所以应该升级到更高版本。查阅 Linux 系统文档，可能有某些选项支持大内存。命令“uname –a”用来显示 Linux 内核的版本号。

在 64 位计算机上，当使用 64 位版本的 OptiStruct 和 64 位操作系统时，OptiStruct 可以使用系统中的全部可用内存（物理内存和虚拟内存）。但是，可用内存的大小仍然受到系统内标准整数变量大小的限制，当然这只在很少的情况下发生。目前，OptiStruct 的线性求解器有两种版本：一种使用 32 位整数，另一种使用 64 位整数。默认使用 32 位的求解器（需要更少的内存和硬盘并且运行较快）。但当问题达到一定规模时，会自动启用 64 位求解器。

OptiStruct 会自动考量系统内存限制，并在需要的情况下申请尽可能多的内存。当它显示预估的需要的内存时，并不会指出是否超出系统限制（即忽略实际可用的内存大小。因此，当它没有给出核内求解所需要的内存时，说明 OptiStruct 不能用核内求解来解决这一问题，即使系统没有内存限制）。

➢ 虚拟内存和物理内存。

OptiStruct 能够使用的内存数量多于系统物理内存（即系统安装的物理内存），这就是虚拟内存（交换空间）的作用。但是，如果 OptiStruct 仅使用物理内存，其效率将会更高（要为操作系统和同时运行的软件保留一部分内存）。当所需的内存超出实际可用物理内存时，因为交换数据，OptiStruct 会运行得较慢。此时硬盘持续运行而只占用很少的 CPU，并且求解总时间和 CPU 运行时间之间将会有较大的差别。

通过命令选项“-len”设置 OptiStruct 使用的内存数量，实际上仅仅是给 OptiStruct 一个系统可用物理内存数量的提示（也就是说，应该设置为操作系统和其他软件没有使用的那一部分物理内存。从上面的分析可知，这个数量通常低于系统总的物理内存）。基于这些信息，OptiStruct 将会决定是否使用核内求解或者在需要的时候使用核外求解或最小核心求解。如果最小核心求解所需内存大于“-len”所给定的内存，OptiStruct 将会忽略这个限制而请求它所需要的尽可能多的内存。换句话说，不应高估“-len”选项的作用，它对大型任务没有帮助，相反，它可能会因为过多的使用交换文件而降低数据处理速度。

在大多数机器上，OptiStruct 会向系统请求可用的内存信息。这些信息会输出在.out 文件的起始部分，根据这一信息，在求解所需要的内存不足时，它会给出求解可能失败的警告。由于可用内存是动态变化的（取决于该机器上同时运行的其他程序），所以 OptiStruct 内部并不使用它们，而是使用用户提供的数据（例如，“-len”参数或配置文件中的信息）。

➢ 自动申请内存和固定内存运行。

在标准模式下，OptiStruct 会估算需要的内存数量，然后逐步向操作系统申请内存。如果内存是一次申请到的而不是逐渐增加的（特别是对 32 位的操作系统），内存将会更加高效。用户可以通过命令选项“-fixlen”来设置为一次申请全部所需内存（参考运行参数（Run Options））。当使用“-fixlen”选项时，OptiStruct 可能会由于内存请求错误而在启动后某一时间结束。这种情况发生在“-fixlen”选项非常接近所有系统可用内存时，因为除了 OptiStruct 求解器需要的内存外，OptiStruct 还会启动带宽最小化进程，这个进程需要少量额外的内存。在设置“-fixlen”选项时，设置稍小一些的值或许可以解决这个问题。这又一次说明了不应给 OptiStruct 指定过多的内存。

➢ 内存使用的其他设定。

在自动模式下，OptiStruct 有一个新的命令选项：“-maxlen”。这个选项可用于设置某些批处理任务，它只允许 OptiStruct 使用不超过设定值的内存。注意：对于那些需求内存大于这一选项的模型，OptiStruct 可能会在计算运行一段时间后终止。

1.6 OptiStruct 运行参数设置

OptiStruct 具有丰富的运行参数控制，从而使用户可以根据软硬件系统的信息设置最佳的运行参数，提高运行效率。具体运行参数如表 1-4 所示。

表 1-4 OptiStruct 运行参数设置

选 项	参 数	描 述	有 效 性
-len	内存大小，单位为 MB	表示动态内存分配的上限 求解器会基于内存需求自动选择 in-core, out-of-core 或最小 core 求解。不论指定内存为多少，OptiStruct 至少会尝试使用最小 core 求解。此选项将被“-core”选项覆盖 默认值为 320MB (示例：optistruct infile.fem –len 32)	所有平台
-maxlen	内存大小，单位为 MB	表示动态内存分配的强制上限 OptiStruct 不会超过这个限制 无默认值 (示例：optistruct infile.fem –maxlen 1000)	所有平台
-core	in, out, min	参数 in：表示强制使用 in-core 求解 参数 out：表示强制使用 out-of-core 求解 参数 min：表示强制使用最小 core 求解 求解器适当分配所需的内存。如果没有足够的可用内存，OptiStruct 将会报错。此选项将会覆盖“-len”选项 (示例: optistruct infile.fem –core in)	所有平台
-fixlen	内存大小，单位为 MB	表示不使用动态内存分配 OptiStruct 将分配指定数量的内存，并在求解过程中一直使用它们。如果内存不可用或求解进程中内存不足，OptiStruct 将报错并终止。为了防止不当地指定内存，建议首先使用-check 选项运行 OptiStruct，然后使用它预测的结果去适当地定义“-fixlen”的内存参数大小 在某些平台上，此选项可以避免产生内存碎片并且与动态内存分配相比，它可能申请到更多的内存 此选项将被“-len”和“-core”选项覆盖 (示例: optistruct infile.fem - fixlen 500)	所有平台
-rsf	安全系数	表示为内存申请的上限设定一个安全系数 已定义“-maxlen”选项时，此选项不可用。 (示例 1: optistruct infile.fem –rsf 1.2) (示例 2: optistruct infile.fem –len 32 –rsf 1.2) (示例 3: optistruct infile.fem –core out –rsf 1.2)	所有平台
-check	无参数	表示通过命令行提交一个检查作业 所需内存自动分配 不能与“–analysis”，“-optskip”或“–restart”选项同时使用 (示例: optistruct infile.fem –check)	所有平台
-checkel	YES, NO, FULL	如果为“NO”，将不进行单元质量检查，但是将进行数学有效性的检查 如果为“YES”，或没有参数，将会检查每个单元的质量。任何一项超出错误限定阈值将会引发一个致命错误并导致运行终止。任何一项超出警告阈值则不是致命的。单元质量的错误或警告信息以及超过限定的单元质量指标将被输出。每类信息仅输出前 3 个，还会输出所有错误信息的汇总表 如果为“FULL”，与“YES”时同，将会进行单元质量检查，但所有单元质量不满足要求的错误或警告信息都会输出 默认值为 YES。 (示例 1: optistruct infile.fem –checkel full) (示例 2: optistruct infile.fem –checkel)	所有平台

（续）

选　项	参　数	描　述	有 效 性
-analysis	无参数	表示提交一个分析作业。此选项也会检查优化参数设置。如果有任何错误，任务将会终止 “-optskip”选项将会忽略优化设置仅运行分析作业 不能与“-check”或“-restart”选项同时使用 (示例: optistruct infile.fem –analysis)	所有平台
-optskip	无参数	表示提交一个分析作业而不检查优化参数设置（忽略所有与优化有关的卡片） 不能与“-check”或“-restart”选项同时使用 (示例: optistruct infile.fem -optskip)	所有平台
-restart	filename.sh	表示定义一个重启动作业。如果不提供参数，OpitStruct 将会在相同的目录下寻找后辍名为.sh 的重启动文件作为输入文件。如果在计算机上输入一个参数，必须包含重启动文件的完整路径及文件名 不能与“-check”，“-analysis”或“–optskip”选项同时使用 (示例 1: optistruct infile.fem -restart); OptiStruct 搜索重启动文件 infile.sh (示例 2: optistruct infile.fem –restart C:\oldrun\old_infile.sh); OptiStruct 搜索重启动文件 old_infile.sh	所有平台
-reanal	密度阈值	此选项只能与“–restart”选项联合使用 在一个重启动作业中包含此选项将对最后一步迭代进行重新分析 如果指定的“密度阈值”小于优化参数 MINDENS（默认值为 0.01），则所有单元将被赋予优化过程最后一个迭代步的密度值 如果指定的“密度阈值”大于优化参数 MINDENS，则密度小于阈值的单元，它们的密度将被设定为 MINDENS 的值，其他单元的密度将被设定为 1.0 (示例: optistruct infile.fem -restart -reanal 0.3)	所有平台
-xml	无参数	表示为多体动力学求解序列指定输入文件为一个 XML 文件	所有平台
-acf	无参数	表示为多体动力学求解序列指定输入文件为一个 ACF 文件	所有平台
-out	无参数	表示将.out 输出文件内容打印至屏幕。此选项优先级高于 I/O 选项 SCREEN (示例: optistruct infile.fem -out)	所有平台
-outfile	输出文件名的前辍	表示定向输出文件到一个不同于输入文件所在的文件夹。如果此文件夹不存在，则输出到其默认的工作目录，指定的参数作为输出文件的前辍。此选项优先级高于 I/O 选项 OUTFILE (示例: optistruct infile.fem -outfile results); 此时 OptiStruct 将输出 results.out 等	所有平台
-scr or -tmpdir	path, filesize=n, slow=1	表示指定临时文件写入的文件夹。参数 filesize=n 和 slow=1 为可选项。多个参数可以用逗号分隔 path：表示指定交换文件存储路径。 filesize=n：表示定义可以写入该路径的交换文件的最大尺寸（单位为 GB） slow=1：表示指定一个网络驱动器 (示例 1: optistruct infile.fem –scr filesize=2,slow=1,/network_dir/tmp) 重复参数“-tmpdir”或“-scr”可以定义多个交换文件路径 (示例 2: optistruct infile.fem –tmpdir C:\tmp –tmpdir filesize=2,slow= 1,Z:\network_drive\tmp) 此选项将覆盖环境变量 OS_TMP_DIR 和定义在输入文件 I/O 部分的 TMPDIR 选项 更多详细描述，请参考 I/O 选项 TMPDIR	所有平台
-scrfmode	basic, buffered, unbuffer, smbuffer, stripe	表示为线性求解器选择不同的临时文件存储模式（特别是 out-of-core 和 minimum-core 求解）。多个参数用逗号分隔 (示例: optistruct infile.fem –scrfmode buffered, stripe – tmpdir C:\tmp) 更多详细描述，请参考 I/O 选项 SYSSETTING	所有平台
-ramdisk	虚拟磁盘大小，单位为 MB	表示指定在虚拟硬盘的大小。(示例: optistruct infile.fem –ramdisk 800) 更多详细描述，请参考 I/O 选项 SYSSETTING 中的 RAMDISK 设置	所有平台
-amls	无参数	表示调用外部的模态特征值求解器。环境变量 AMLS_EXE 需指向 AMLS 的可执行文件 此选项会覆盖输入文件中 PARAM, AMLS 的设置 (示例: optistruct infile.fem –amls)	所有平台

（续）

选　　项	参　　数	描　　述	有　效　性
-amlsncpu	1, 2, 或 4	表示定义外部 AMLS 特征值求解器使用的 CPU 个数。此参数将会定义环境变量 OMP_NUM_THREADS 默认值为当前 OMP_NUM_THREADS 的值。注意这个值可以通过命令行参数“-nproc”或“-ncpu”指定 OptiStruct 和 AMLS 可以在运行中调用不同数量的处理器。例如：在同一个作业中 OptiStruct 使用 1 个处理器，而 AMLS 使用 4 个处理器 只能与“-amls”选项同时使用或当 PARAM, AMLS 设定为“YES”时有效 此选项将会覆盖输入文件中 PARAM, AMLSNCPU 的设置 默认值为 OptiStruct 使用的处理器个数 (示例: optistruct infile.fem –amls –amlsncpu 4)	所有平台
-cpu or -proc or -nproc or -ncpu	核心数	表示 SMP 求解所使用的核心数 (示例: optistruct infile.fem -ncpu 2)	所有平台
-lic	FEA, ADVFEA, HFS, RADIOSSA, RADIOSSB, OPT	FEA - 仅有限元分析(OptiStructFEA) ADVFEA - 高级分析(OptiStructAdv) HFS - 金属成形一步法求解(HyperFormSolver) RADIOSSA - 基本的有限元分析(RadiossA) RADIOSSB - 高级有限元分析(RadiossB) OPT - 优化 (OptiStruct or OptiStructMulti) 在读入输入数据之前，求解器检查是否具有指定类型的 license。一旦输入数据读入，说明求解器已证实请求的 license 类型正确。如果不正确，OptiStruct 将会出错并终止 无默认值 (示例: optistruct infile.fem -lic FEA)	所有平台
-mio	无参数	表示打开模块化 I/O 注意：主机上应打开异步 I/O (示例: optistruct infile.fem -mio)	AIX
-mio_pfcache	MIO PF 缓存大小，单位 MB	表示指定 MIO 所使用的 PF 缓存大小。这一部分内存是在 OptiStruct 使用的内存以外申请的 默认值为 2GB (示例: optistruct infile.fem –mio –mio_pfcache 1000)	AIX
-mpi	无参数	在支持的平台上启动一个基于 MPI 的 MPP 作业 注意：需要 HP-MPI (示例: optistruct infile.fem –mpi –np 4)	Linux
-np	处理器数	在 MPP 分析中使用的处理器数 (示例: optistruct infile.fem –mpi –np 4)	Linux
-mpipath	路径	表示指定包含 HP-MPI 可执行程序的文件夹路径 注意：如要在同一系统中安装了不同供应商的 MPI，此选项是有用的，只对 MPI 作业有效 (示例: optistruct infile.fem –mpi –np 4 –mpipath /apps/hpmpi/bin)	Linux
-testmpi	无参数	检查 HP-MPI 是否配置正确以及 OptiStruct 的 MPP 版本在系统中是否可用 (示例: optistruct infile.fem –mpi –np 4 –mpipath /apps/hpmpi/bin -testmpi)	Linux
-version	无参数	检查 OptiStruct 版本及发布时间	所有平台
-manual	无参数	启动 OptiStruct 在线用户手册	UNIX 和 Linux
-h	无参数	显示脚本用法	所有平台
-compress	无参数	提交一个 compression 作业 减少重复的材料和属性定义。生成的 bulk data 文件为<filename>.echo。不能与其他任何选项同时使用。更多信息请参考 OptiStruct Compression Run (示例: optistruct infile.fem –compress)	所有平台

1.7 小结

本章介绍了 OptiStruct 的优化流程和各阶段的理论方法、优化响应类型、优化控制卡片和运行参数。这些内容对于如何正确设置优化问题，如何提高优化运行效率，如何调试优化模型等具有重要的指导意义。读者如果在做后续章节的练习，以及在实际工程项目中遇问题，可以重读本章寻求解释，或者阅读在线帮助文档以了解更多信息。

第 2 章

拓扑优化技术实例



拓扑优化技术是结构优化技术中有前景、具有创新性的技术，是指在给定的设计空间内找到最佳的材料分布，或者传力路径，从而在满足各种性能的条件下得到重量最轻的设计。Altair OptiStruct 是目前公认优化算法稳健、优化类型全面、工程实用价值大的商用拓扑优化软件。

本章重点知识

2.1 拓扑优化技术简介
2.2 实例：C 形夹结构的概念设计
2.3 实例：利用加强筋提高汽车挡板的固有频率
2.4 实例：汽车控制臂的概念设计
2.5 实例：使用 CWELD 单元进行焊点拓扑优化
2.6 实例：利用 DMIG 进行模型缩减的拓扑优化
2.7 实例：矩形板的频率响应优化
2.8 拓扑优化卡片
2.9 小结

2.1 拓扑优化技术简介

拓扑优化中常用的拓扑表达形式和材料插值模型方法有：

- ✓ 均匀化方法（Homogenization Method）。
- ✓ 密度法（如各向正交惩罚材料密度法，即方法 SIMP，Solid Isotropic Material with Penalization Model）
- ✓ 变厚度法。
- ✓ 拓扑函数描述方法。

2.1.1 单元密度

OptiStruct 拓扑优化的材料模式采用密度法（SIMP 方法），即将有限元模型设计空间的每个单元的“单元密度（Density）”作为设计变量。该“单元密度”同结构的材料参数有关（单元密度与材料弹性模量 E 之间具有某种函数关系），0～1 之间连续取值，优化求解后单元密度为 1（或靠近 1）表示该单元位置处的材料很重要，需要保留；单元密度为 0（或靠近 0）表示该单元处的材料不重要，可以去除，从而达到材料的高效率利用，实现轻量化设计。如图 2-1 所示，两端简支的垂直放置平板在受力作用下，当给定右下方的 ρ-E 曲线关系时，优化后的黑色的单元（单元密度靠近 1）的材料组成了传力路径在设计中要保留，而灰色的单元（单元密度靠近 0）的材料则可以去除。

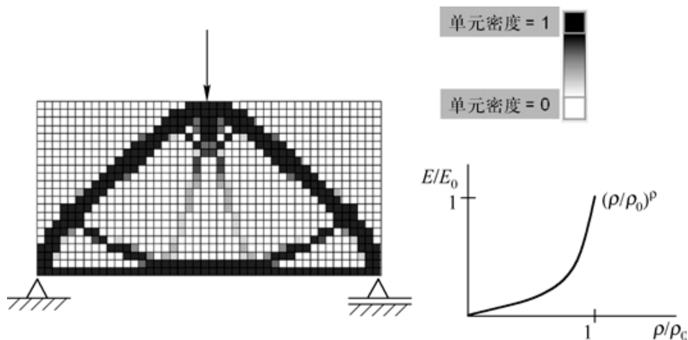


图 2-1 单元密度的 0～1 取值结果

2.1.2 制造工艺约束

优化技术在工业界推广面临的第一个问题就是其结果的可制造加工性。一个在现有工艺条件下不能被加工，或者加工成本很高的优化结果，是没有任何实用价值的。OptiStruct 在拓扑优化中充分考虑了零件的可加工性，创新地把制造加工过程中需要考虑到的因素融合到优化问题的定义中，在工业界备受推崇。

在拓扑优化阶段，OptiStruct 可考虑的制造工艺包括以下几个方面。

✓ 棋盘格现象。
✓ 最小成员尺寸。
✓ 最大成员尺寸。
✓ 拔模约束。
✓ 挤压约束。
✓ 模式组（各种对称）。
✓ 均一密度。
✓ 模式重复。

通过灵活应用上述制造工艺约束，或者多种工艺约束的组合，OptiStruct 可以充分考虑产品实际加工过程的各种约束，从而使得优化结果便于制造，优化流程真正集成到产品开发过程中。

1．棋盘格现象

棋盘格是指在计算区域中出现材料密度为 1 和 0 的单元（或半密度单元）呈周期性分布的现象。如图 2−2 所示，棋盘格的出现导致优化结果的信息不清，不利于新零件的设计制造。通过 CHECKER 参数可以实现对棋盘格现象的控制。



图 2−2　棋盘格现象及其消除

2．最小成员尺寸

最小成员尺寸是指优化结果中单元密度为 1 的区域的允许最小尺度。施加最小成员尺寸约束可以消除优化结果中细小的传力路径，保证结构最小尺度大于最小成员尺寸，从而得到比较均匀的材料分布，便于铸造过程的材料流动，或提供足够刚度便于刀具加工。

最小成员尺寸约束可以通过 MIMDIM 参数施加。一般来说，最小成员尺寸要大于 3 倍的单元平均尺寸。最小尺寸约束效果如图 2−3 所示。

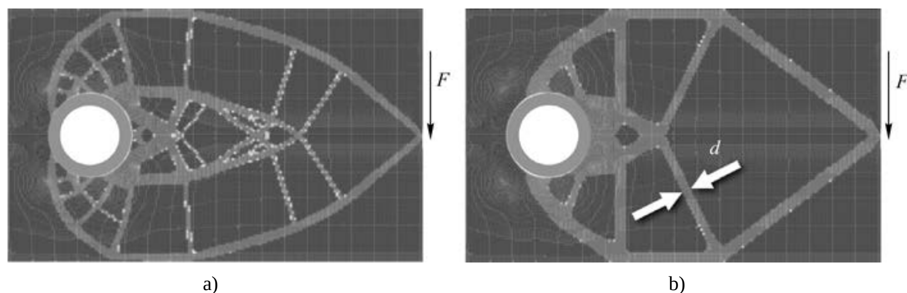


图 2−3　定义最小成员尺寸 *d* 可以消除细小的传力路径

3．最大成员尺寸

最大成员尺寸约束是指优化结果中单元密度为 1 的区域的各向尺度不能全部大于该尺寸。因此，最大成员尺寸约束可以消除优化结果中的材料堆积，避免制造过程引起的产品缺陷（如在铸造过程中散热不均匀），并能提供多个传力路径，以提高产品可靠性。

最大成员尺寸约束可以通过 MAXDIM 参数施加。一般来说，最大成员尺寸要大于两倍的最小成员尺寸。最大尺寸约束效果如图 2−4 所示。

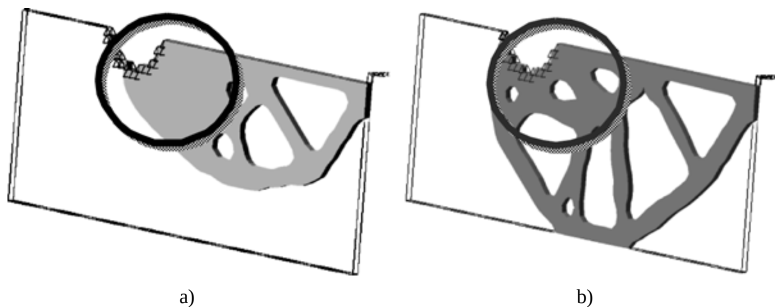


图 2−4　最大成员尺寸约束可以消除材料的堆积

4．拔模约束

对于铸造件，或者机加工件，必须考虑制造加工过程中的拔模，或者刀具的进出，因此，在拔模方向或刀具进出的方向上，不能有材料的阻挡。

拔模约束有单模和双模两种，施加拔模约束只需指定拔模方向即可。除了用于考虑具体的制造工艺约束外，拔模约束也适用于在实体表面产生加强筋结构。拔模约束效果如图 2−5 所示。

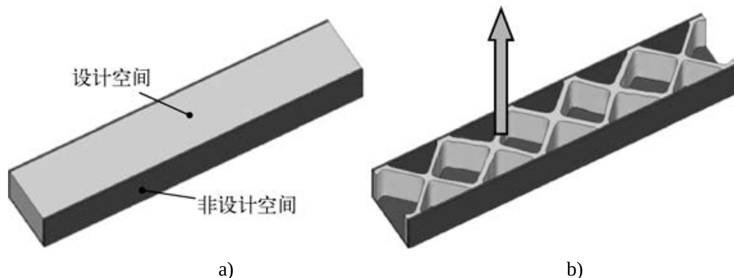
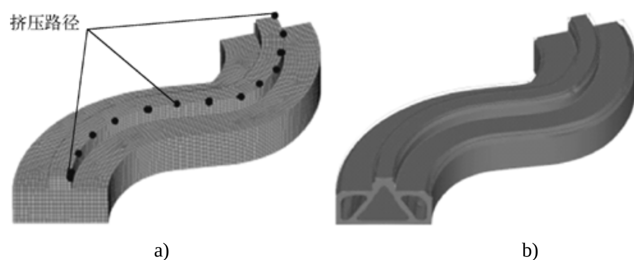


图 2−5　拔模约束可以去除拔模方向上的材料

5．挤压约束

通过指定挤压方向，使材料沿挤压方向的横截界面保持一致，从而优化结果可以采用型材制造。施加挤压约束后，结构优化实际上是对零件所使用的型材的横截面进行优化。用户通过指定一系列的点来定义挤压的路径。挤压路径可以是曲线的和扭转的。挤压效果如图 2−6 所示。



a) b)

图 2−6 挤压约束可以优化型材的横截面

6. 模式组

模式组约束实际上是各种对称模式的约束。对设计空间施加对称约束可以生成对称设计。即使是在网格、边界条件不对称的模型中，OptiStruct 也可以强制生成非常接近于对称的结果。OptiStruct 支持如图 2−7 所示的对称类型。

（1）一平面对称（1-pln sym）：优化结果关于某个平面对称。定义单个中间平面需要提供一个锚点（anchor grid）以及参考点（reference grid），如图 2−8 所示。

none	uniform
1-pln sym	cyclic
2-plns sym	cyc 1-pln
3-plns sym	

图 2−7 模式组约束面板

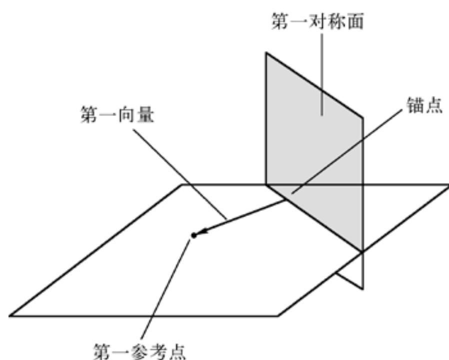


图 2−8 一平面对称

（2）二平面对称（2-pln sym）：优化结果关于某两个垂直的平面对称。定义两个中间平面，需要提供一个锚点（anchor grid）以及两个参考点（reference grid），锚点与第一个参考点（first reference grid）确定第一个对称面（first Plane），锚点与第二个参考点（second reference grid）在第一个对称面上的投影点的连线确定第二个平面的法向，如图 2−9 所示。

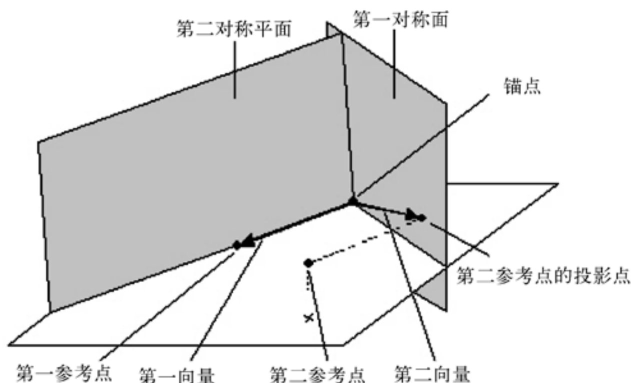


图 2−9 二平面对称

（3）三平面对称（3-pln sym）：优化结果关于某三个垂直的平面对称。定义 3 个中间平面，与两个中间平面的定义相同，第三个中间平面与已定义好的两个对称面正交，并通过锚点，如图 2−10 所示。

（4）周向循环对称（cyclic）：周向循环对称将设计空间围绕某对称轴等分为用户指定数量的扇形区域，各扇形区域的优化结果一致。用户需要指定锚点和第一参考点确定对称轴方向，然后指定扇形区数量，如图 2−11 所示。

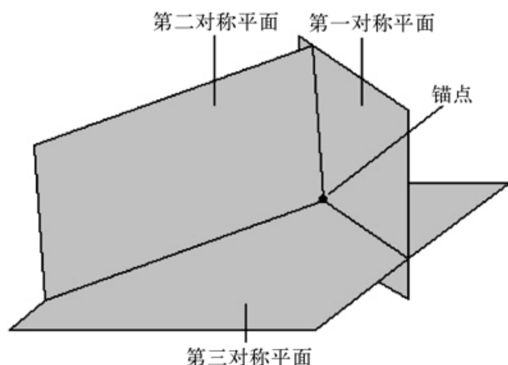


图 2−10　三平面对称

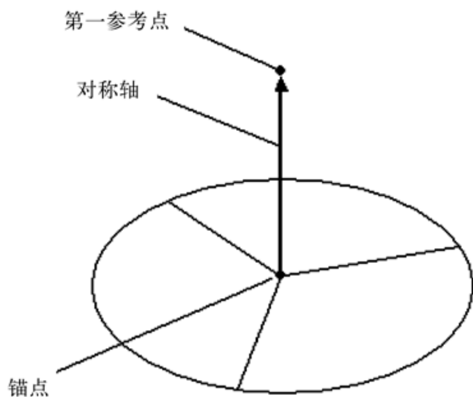


图 2−11　三等分的周向循环对称

（5）周向循环及一平面对称（cyc 1-pln）：周向循环及一平面对称在周向循环对称的基础上，对每个扇区指定一个中间平面，从而保证每个扇区的优化结果同时是一平面对称的，如图 2−12 所示。

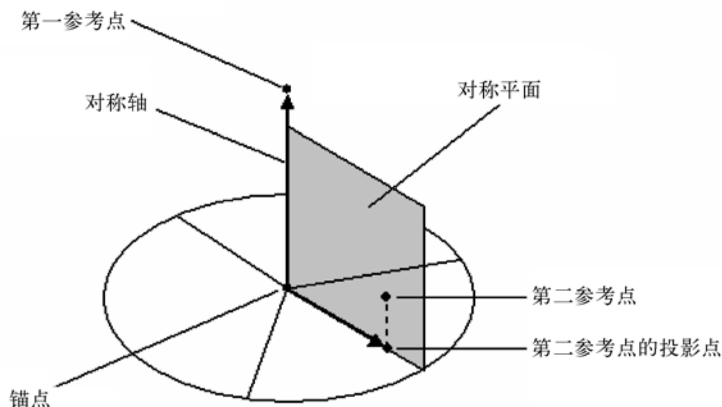


图 2−12　周向循环及一平面对称

7．均一密度（uniform）

在拓扑优化中，设计区中每个单元的单元密度是一个设计变量，优化结果中设计区内的单元密度一般是从 0～1 分布的。均一密度约束可以强制每个设计区中所有单元的单元密度一致，从而可以判定每个设计区的重要性。

使用均一密度约束，可以实现对“零件重要性”的优化，即该零件的密度如果为 1，表示该零件非常重要；密度为 0，表示该零件不重要可去除。

8．模式重复

通过指定零件某一区域或多个区域的结构样式和另一区域保持一致，或某方向进行比例缩放，从而减少工艺设计和制造加工的工作量。

定义模式重复的步骤如下：

- ✓ 创建主设计区，主设计区的模式将被复制到从设计区。
- ✓ 对主设计区施加其他的制造加工约束，确保主设计区具有良好的可制造加工性。
- ✓ 定义附着于主设计区的局部坐标，该局部坐标用于确定主从设计区的位置关系。局部坐标可以是已经定义好的坐标系，也可以采用当场选择 4 个节点确定。局部坐标系既支持右手坐标系，也支持左手坐标系，用户可以根据设计空间的实际情况选用。
- ✓ 创建从设计区，从设计区在结构样式上将与主设计区保持一致。

定义附着于从设计区的局部坐标系，遵循以下原则：

当从设计区的局部坐标系与主设计区的局部坐标调整到重合时，从设计区的结构样式与主设计区也重合或关于某坐标方向按比例缩放。

如果有必要，定义关于某坐标方向的比例缩放因子。

用户可以重复上述步骤定义指向同一个主设计区的多个从设计区。

模式重复的功能非常强大，主设计区和从设计区的网格，边界条件无需保持一致，OptiStruct 将在从设计区强制生成与主设计区结构模式一样的优化结果。图 2-13 是飞机翼肋优化模型的网格。图 2-14 是施加模式重复约束后的优化结果。可以看出，尽管翼肋的网格各不相同，但优化后的结构模式是一样的，非常便于设计和制造加工。

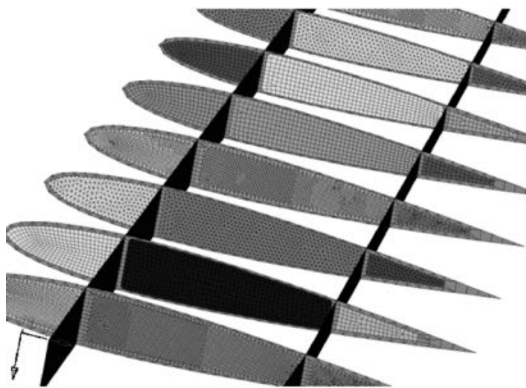


图 2-13　翼肋的网格模型

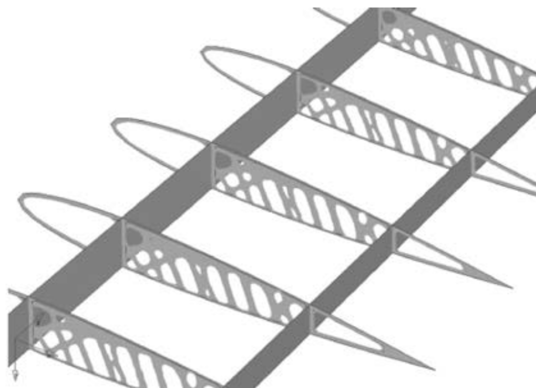


图 2-14　施加模式重复约束后的优化结果

2.1.3　OSSmooth模块介绍

OSSmooth 是一个半自动化的工具，用于将拓扑、形貌或者形状优化设计结果根据一定的单元密度阈值（或者网格变形），解释成 CAD 模型，以便导入 CAD 软件做设计参考，或者快速生成新设计网格模型，然后提交 Radioss 进行重新计算。OSSmooth 的内部处理流程

如图 2−15 所示。

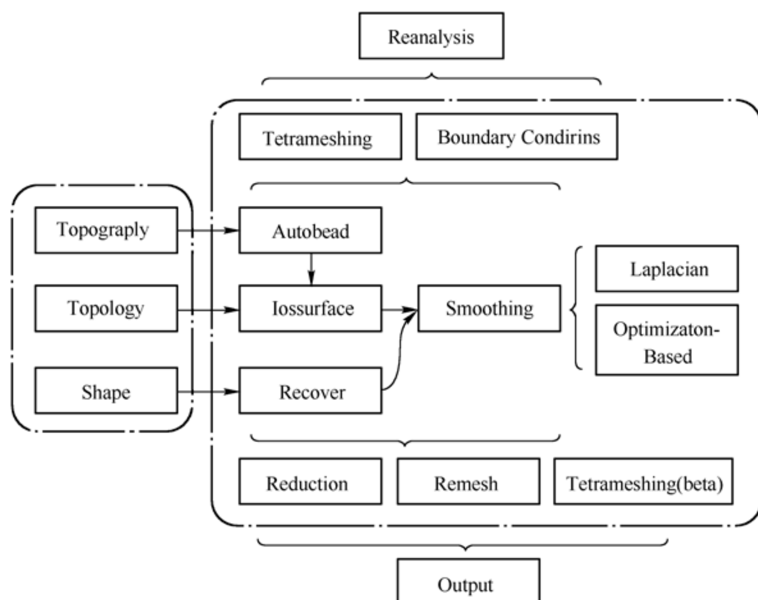


图 2−15　OSSmooth 的内部处理流程

对于根据拓扑优化结果快速生成新设计网格模型，OSSmooth 根据单元密度结果生成封闭的等值曲面，然后调用四面体网格划分引擎进行网格划分，并可自动保留原有设计的边界条件（一般讲原有设计加载边界条件的区域设为非设计空间），从而方便进行快速分析。

图 2−16 为保留边界条件生成新设计有限元模型。

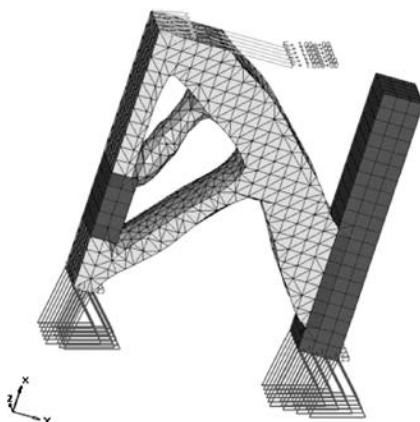


图 2−16　保留边界条件生成新设计有限元模型

2.2　实例：C形夹结构的概念设计

在本实例中，通过分别对模型实施最小成员尺寸约束方法和不实施最小成员尺寸约束方法

进行拓扑优化，创建新的拓扑结构，并移除多余的材料。熟悉拓扑优化的基本设计流程，并通过对比了解最小成员尺寸约束方法的作用，最终得到的结构更轻，并满足所有约束的设计。

优化问题描述如下。

- ✓ 目标：体积分数最小化。
- ✓ 约束：节点 *A* 在 *y* 方向的位移小于 0.07mm，节点 *B* 在 *y* 方向的位移小于 0.07mm。
- ✓ 设计变量：设计空间里每个单元的密度。

本实例主要包含以下内容：

- ✓ 在 Hypermesh 中建立模型。
- ✓ 模型静力分析。
- ✓ 设置优化。
- ✓ 查看优化结果。

STEP 01 启动 Hypermesh 并设置用户配置文件

（1）在“开始”菜单中启动 Hypermesh。默认情况下，User Profiles 对话框将弹出。

（2）选中 User Profiles 上 Optistuct 左侧的按钮。

（3）单击 OK 按钮。

这样就加载了 RADIOSS/Bulk 和 Optistruct 所对应的 Hypermesh 设置。

STEP 02 打开 cclip.hm 文件

（1）单击按钮，选择 cclip.hm。

（2）单击打开。

这样将载入 cclip.hm 到 Hypermesh 中，并取代了现有的文件。该文件中只包涵几何信息和网格信息。

STEP 03 创建材料和属性并赋给组件

（1）因为组件需要材料，所以必须先创建一个材料组件。

（2）单击 Model 按钮。

在模型浏览窗口内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，激活其二级菜单并单击 Material，如图 2-17 所示。在 Name 栏中输入 Steel，在 Card image 栏中选择 MAT1。

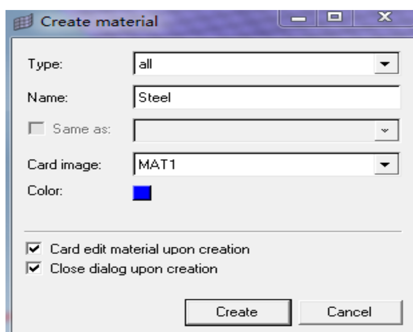


图 2-17　材料创建窗口

（3）勾选 Card edit material upon creation 复选框，单击 Create 按钮。

（4）弹出 MAT1 界面，设置 E 为 2.0E5，Nu 为

0.3，RHO 为 7.9E-09。单击设置项，如[E]，即可激活该选项，并输入值，如图 2−18 所示。

	ID	[E]	[G]	[NU]	[RHO]	[A]	[TREF]	[GE]
MAT1	2	2.1e+05		0.300	7.9e-09			
	[ST]	[SC]	[SS]					

图 2−18　材料卡片信息

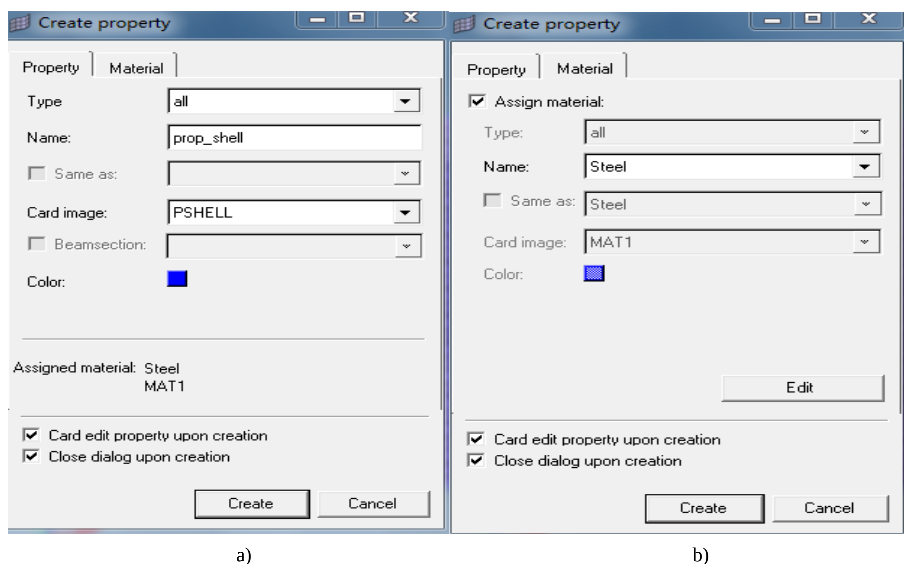
（5）单击 return 按钮。

在模型浏览窗口内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，激活其二级菜单并单击 Property。

（6）在 Name 栏中输入 prop_shell。

（7）在 Card image 栏中选择 PSHELL。

（8）单击 material 选项卡，并选择 Steel，如图 2−19 所示。



a)　　　　　　　　　　　　b)

图 2−19　属性创建窗口

（9）单击 Create 按钮。弹出 PSHELL 卡片设置界面。创建了一个新属性，并将叫 Steel 的材料与该属性关联。MID1 对应着材料 ID 为 2，即 Steel 的 ID。

（10）弹出 PSHELL 界面，激活 T，保持默认值为 1.0。

（11）单击 return 按钮。

（12）单击 Components 图标，为组件更新新创建的属性。

（13）选择 update 子面板，单击 comps，进入已有组件选择界面单击左键选择 comp_shell，然后单击 select，选中组件 comp_shell。

注：左键是选中，右键是反选。

（14）单击 no property，切换 property = ，选中 prop_shell。

最终结果，如图 2−20 所示。

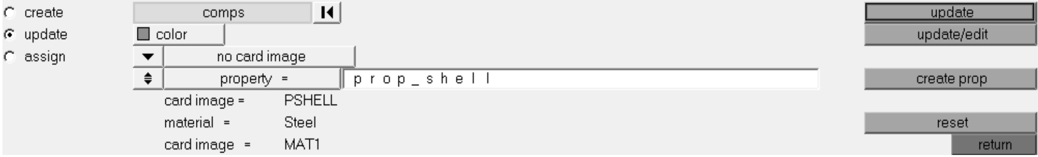


图 2-20 属性更新面板

（15）单击 update 按钮。

（16）单击 return 按钮。

STEP 04 创建载荷集合器

下面创建两个载荷工况（约束和集中载荷），并分别赋给不同的颜色。

（1）在模型浏览窗口内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，激活其二级菜单并单击选择 LoadCollector。

（2）在 Name 栏中输入 Constraints。

（3）保持 Card image 为 none。

（4）在面板中为该载荷选择一种颜色。

（5）单击 Create 按钮。

（6）重复步骤（1）～（5）步，创建名为 Forces 的载荷工况。

STEP 05 创建约束边界条件

对于在图 2-21 中显示的 3 个约束的节点，我们需要按照下列步骤创建 SPC 类约束，并把它们赋到已创建的 Constraints 载荷工况里。

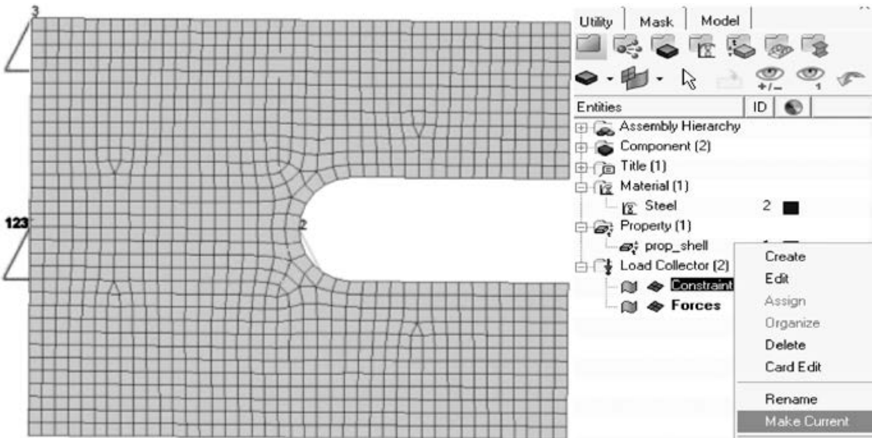


图 2-21 约束创建

（1）在模型浏览窗口中，展开 LoadCollector，在 Constraints 上单击鼠标右键，选择 Make Current。

（2）从 Analysis 页，进入 constraints 面板，按照图中 3 个节点的约束情况对模型进行操作。

（3）单击 return 按钮。

STEP 06 施加力边界条件

在 C 形夹开口的两端分别施加两个相反的力，大小为 100N。

（1）在模型浏览窗口中，展开 LoadCollector，在 Forces 上单击鼠标右键，选择 Make Current。

（2）从 Analysis 页，进入 forces 面板，如图 2−22 所示。

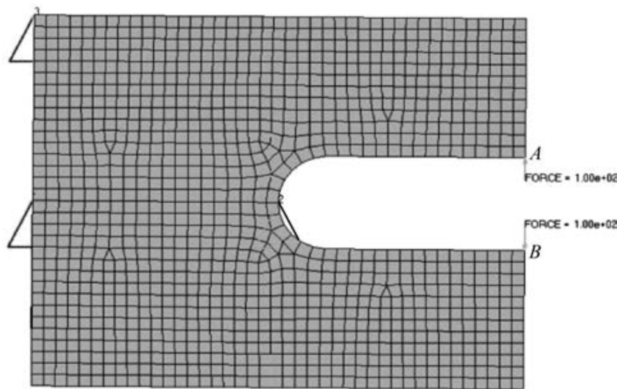


图 2−22　载荷创建

（3）在节点 *A* 处创建一个集中力，在 magnitude 栏中输入 100，切换方向选择器到 y-axis。

（4）单击 create 按钮。

（5）类似地，在节点 *B* 处创建一个集中力，在 magnitude 栏中输入−100，确认方向选择器处于 y-axis。

（6）单击 create 按钮。

（7）为了分清代表两个集中力的箭头，在 uniform size 栏中输入 7，并按回车键。

注：uniform size 用于显示尺寸大小的调节。

STEP 07 创建载荷工况

创建载荷步是创建边界条件的最后一步。

（1）从 Analysis 页，进入 loadsteps 面板。

（2）在 name 栏中输入 opposing forces。

（3）设置载荷步类型为 linear static。

（4）勾选 SPC，单击右侧 = 0，选择已创建的约束 Constraints。

（5）勾选 Load，单击右侧 = 0，选择已创建的载荷 Forces。

（6）单击 create 按钮。

（7）单击 return 按钮，返回 Analysis 页。

STEP 08 执行计算

在定义优化过程之前，对 C 形夹执行线性静力分析。通过该分析，可以帮助识别该结构的响应情况，并确保为优化定义的约束是合理的。

（1）从 Analysis 页，进入 RADIOSS 面板。

（2）单击 save as 按钮。

（3）选择结果文件放置的文件夹，并输入自定义文件名，本实例记为 cclip.fem。

（4）单击 Save 按钮。

（5）设置 export option、run option、memory options，如图 2-23 所示。

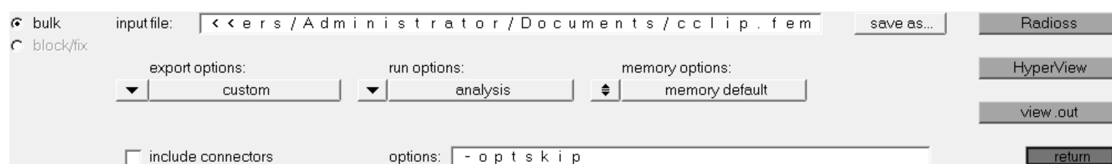


图 2-23　任务递交面板

（6）单击 Radioss 按钮。

分析结束后，如果 ANALYSIS COMPLETED 显示在命令窗口则表示计算成功。

STEP 09 分析结果后处理

（1）在 Radioss 面板下，单击 HyperView。

（2）HyperView 加载文件 cclip.mvw，包括模型和结果文件。

（3）单击，进入云图。

（4）按照下图设定，查看 y 轴方向上的位移，单击 Apply，如图 2-24 和图 2-25 所示。

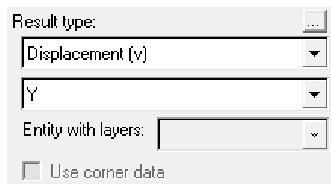


图 2-24　结果类型设置

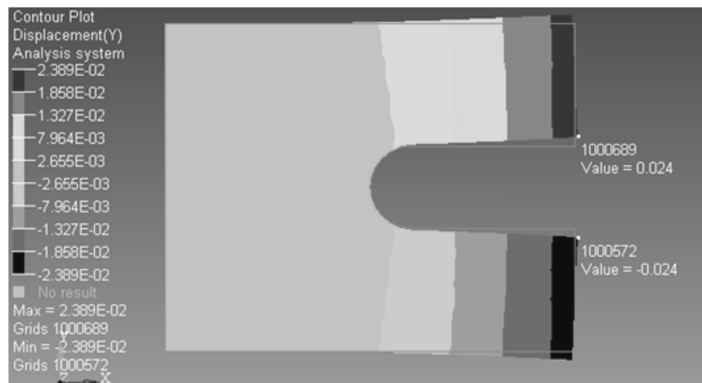


图 2-25　分析结果云图

（5）从 File 下拉菜单中，选择 Exit 命令退出 HyperView。

STEP 10 定义拓扑优化的设计变量

前面已经定义了包含壳单元、单元属性、材料属性、载荷和边界条件的有限元模型。现在需要对模型进行拓扑优化，优化的目标是减少使用的材料。但是，减小材料后可能会导致模型刚度的降低以及变形加剧。因此，在优化过程中需要确定位移的约束，这样就可以在使用的材料和模型的总体刚度上达到一定的平衡。

在结构上的外力作用点是夹子开口部分的节点，这两个节点处会较大的位移，需要对这两个节点的位移进行约束，使其在 *y* 轴方向上的位移不超过 0.07。

（1）从 Analysis 页，进入 optimization 面板。

（2）选择 topology。

（3）选择 Create 子面板。

（4）在 desvar 栏中输入 d_shell。

（5）单击 props，进入已有组件选择界面，勾选 prop_shell，单击 select。

（6）切换 type 到 PSHELL。

（7）确认 base thickness= 0.0，如图 2−26 所示。

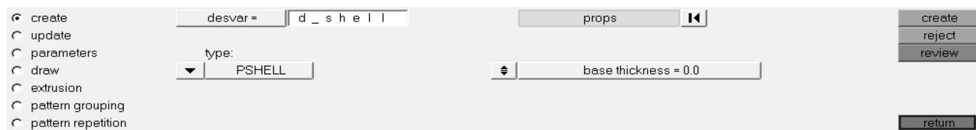


图 2−26　变量创建面板

注：0 值表明在特定单元的厚度值可以为 0，即该处可以有洞产生。

（8）单击 create 按钮。

（9）在 desvar 栏中输入 d_shell_1。

该设计变量利用最小成员尺寸控制方法。

（10）单击 props，进入已有组件选择界面，勾选 prop_shell，单击 select。

（11）切换 type 到 PSHELL。

（12）确认 base thickness= 0.0，单击 create 按钮。

（13）选择 Parameters 子面板。

（14）单击 desvar，选择已创建的 d_shell_1。

（15）按〈F4〉键进入 distance 面板，选中 two nodes 子面板，单击 N1 激活该项，选择任意节点，然后 N2 自动激活，选择同一单元中的另一节点。对不同单元重复几次以上操作，获得单元平均尺寸，该模型的单元尺寸大约为 2.5。

（16）切换到 mindim，输入 5。

（17）MINDIM 一般推荐值为单元平均尺寸的 3 倍。如果模型网格比较整齐，就像该模

型中的网格，MINDIM 可以是单元平均尺寸的 2 倍，即 5。

（18）单击 update 按钮。

（19）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

STEP 11 创建体积分数响应

（1）从 Analysis 页，进入 optimization 面板，然后进入其下的 response 面板。

（2）在 response 栏中输入 volfrac。

（3）从 response type 的下拉菜单中选择 volumefrac，如图 2-27 所示。



图 2-27　响应创建

（4）单击 create 按钮。

STEP 12 创建位移响应

创建位移响应的时候，尽量为响应设定一个有意义的名字，把响应类型设定为静态位移，选择与该响应对应的节点及节点位移方向。

（1）从 Analysis 页，进入 optimization 面板，然后进入其下的 response 面板。

（2）在 response 栏中输入 upperdis。

（3）从 response type 下拉菜单中选择 static displacement。

（4）单击节点 *A*，并设定位移方向为 dof2。

注：dof1、dof2、dof3，分别代表 *x*、*y*、*z* 方向的线位移。

（5）total disp 代表各方向线位移矢量。

（6）dof4、dof5、dof6，分别代表绕 *x*、*y*、*z* 方向旋转的角位移。

（7）total rotation 代表各方向角位移的矢量和。

（8）单击 create 按钮。

（9）在 response 栏中输入 lowerdis。

（10）从 response type 下拉菜单中选择 static displacement。

（11）单击节点 *A*，并设定位移方向为 dof2。

（12）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮返回 optimization 面板，如图 2-28 所示。

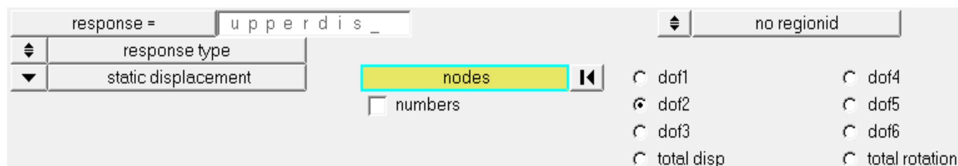


图 2-28　响应创建面板

STEP 13 约束位移响应

该部分为分析设定约束的上限和下限。

（1）进入 dconstraints 面板。

（2）在 constraint 栏中输入 c_upper。

（3）确认仅勾选 upper bound 选项。

（4）在 upper bound 栏中输入 0.07。

（5）单击 response，在弹出的界面中单击已经创建的响应 upperdis。

（6）单击 loadsteps，在弹出的界面中勾选已经创建的载荷步 opposing forces。

（7）单击 create 按钮。

（8）在 constraint 栏中输入 c_lower。

（9）确认仅勾选 lower bound 选项。

（10）在 lower bound 栏中输入−0.07。

（11）单击 response，在弹出的界面中单击已经创建的响应 lowerdis。

（12）单击 loadsteps，在弹出的界面中勾选已经创建的载荷步 opposing forces。

（13）单击 create 按钮。

（14）单击 return 按钮，返回 optimization 面板，如图 2-29 所示。

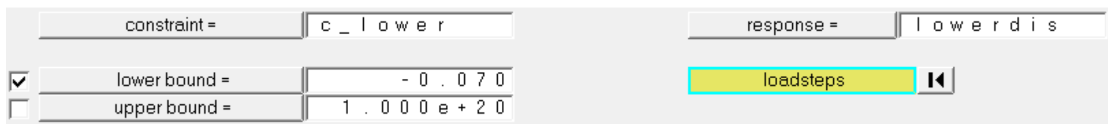


图 2-29　约束创建面板

STEP 14 定义目标函数

（1）单击 objective。

（2）切换到 min。

（3）单击 response，在弹出的界面选择已建立的响应 volfrac，如图 2-30 所示。

（4）单击 create 按钮。

（5）单击两次 return 按钮，退出 optimization 面板。

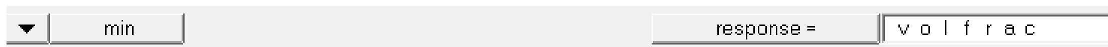


图 2-30　目标创建面板

STEP 15 优化计算

（1）从 Analysis 页，进入 control cards 面板。

（2）单击 next 两次。

（3）单击 SCREEN，然后单击 return 按钮。

（4）这将使得 OptiStruct 在窗口输出优化迭代过程，如图 2-31 所示。

PFPANEL	SENSOUT	TITLE
PROPERTY	SHAPE	TMPDIR
RESPRINT	SHRES	UNITS
RESTART	SUBTITLE	XSHLPRM
RESULTS	SWLDPRM	XSOLPRM
SCREEN	SYSSETTING	
SENSITIVITY	THICKNESS	

图 2-31　计算控制卡片

（5）在 view 下拉菜单中选择 Entity State Brower 命令，如图 2-32 所示。

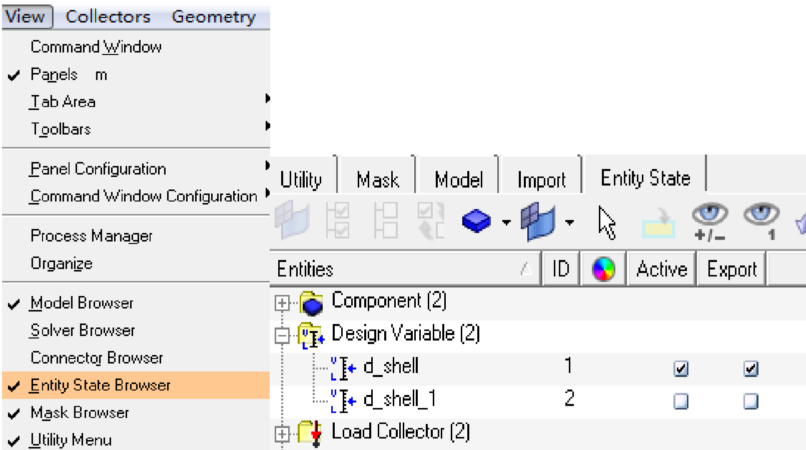


图 2-32　查看模型信息

（6）进入 Entity State 浏览器，展开 Design Variable，去除 d_shell_1 右侧复选框的勾选，这样就只有设计变量 d_shell 处于激活状态。其中，Active 表明是否在模型中显示该集合器，而 Export 表明该集合器中的内容是否参与计算输出。

（7）从 Analysis 页，进入 OptiStruct 面板。

（8）单击 save as 按钮，输入文件名 cclip_complete.fem，单击 Save 按钮。

（9）根据图 2-33 所示，设置 export options、run options 和 memory options。

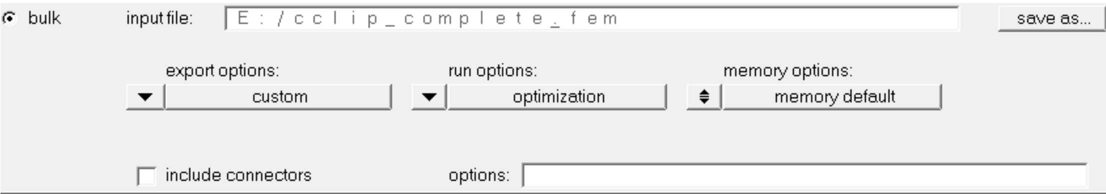


图 2-33　设置任务递交面板

（10）单击 OptiStruct 运行优化计算。

计算完成后，会出现图 2-34 的提示信息。

如果计算中间遇到错误，则 OptiStruct 也会提示错误信息。用文字编辑器打开文件 cclip_complete.out，我们可以从中找到错误的详细信息。该文件和.fem 文件在同一个文件夹

里。这样我们计算出不施加最小成员尺寸约束的优化结果。

（11）关闭 DOS 窗口，单击 return 按钮。

（12）进入 Entity State 浏览器，展开 Design Variable，勾选 d_shell_1 右侧的两个复选框，并去除 d_shell 右侧的复选框，这样就只有设计变量 d_shell_1 处于激活状态，如图 2-35 所示。

```
OPTIMIZATION HAS CONVERGED.
FEASIBLE DESIGN (ALL CONSTRAINTS SATISFIED).
```

图 2-34　显示计算完成信息

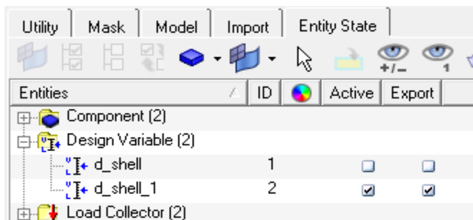


图 2-35　设置模型优化

（13）重复步骤（6）～（11），将其生成的结果文件名改为 cclip_complete_1.fem。这样我们得到施加了最小成员尺寸约束的优化结果。

默认情况下，表 2-1 所示的文件会在运行文件夹中产生。

表 2-1　拓扑优化后的结果文件列表

cclip_complete/ cclip_complete_1.res	HyperMesh 的二进制结果文件
cclip_complete/ cclip_complete_1.h3d	HyperView 的二进制结果文件
cclip_complete/ cclip_complete_1.HM.comp.cmf	根据单元密度的结果将单元组织到组件中的 HyperMesh 命令文件。该文件只产生于拓扑优化运行时
cclip_complete/ cclip_complete_1.out	包含有文件配置的信息，优化问题配置的信息，对计算所需的内存和硬盘空间进行的评价，每次优化迭代的信息及计算时间信息的 OptiStruct 的输出文件。从该文件中可以检查在优化结果文件生成过程中出现的警告和错误
cclip_complete/ cclip_complete_1.sh	最后迭代所产生形状的文件。它包括分析中每个单元的材料密度，无用的尺寸参数及方位角。该文件可用于重新开始一个计算
cclip_complete/ cclip_complete_1.hgdata	HyperGraph 文件包括每次迭代的目标函数、欠约束百分比及约束的数据
cclip_complete/ cclip_complete_1.oss	OSSmooth 文件默认为 0.3 的密度阈值。用户可以在文件中编辑该参数以获得所需的结果
cclip_complete/ cclip_complete_1.hist.mvw	该文件包含目标、约束及设计变量的迭代历程，可用于在 HyperGraph、HyperView 和 MotionView 中绘制曲线
cclip_complete/ cclip_complete_1.stat	该文件包含完成全部分析所需的 CPU 时间，读取输入卡片、组装卡片、分析、收敛等对应的 CPU 时间节点

STEP 16　查看单元密度等值面图

OptiStruct 为所有的迭代提供单元密度信息。它也为线性静力分析提供第 0 步和最后一步迭代的位移及 Von Mises 应力信息。下面介绍如何在 Hyperview 中查看结果。cclip_complete 文件与 cclip_complete_1 文件结果查看方法相同。下面以 cclip_complete 文件为例进行演示。

该图提供了关于单元密度的信息。Iso Value 保留所有单元密度不小于密度阈值的单元。根据自身所需的结构，选取密度阈值。

（1）从 OptiStruct 面板，单击 Hyperview 按钮。

（2）这样将载入 Hyperview，打开包含以下两页结果的 cclip_complete.mvw 文件。

cclip_complete_des.h3d：显示优化的结果历程（单元密度）。

cclip_complete_s1.h3d：显示前部分静力学分析的结果，包括最初值和最终值（位移和应力）。

（3）在第一页（优化结果）中，单击 Results 浏览器区域，并根据如图 2−36 所示进行配置。

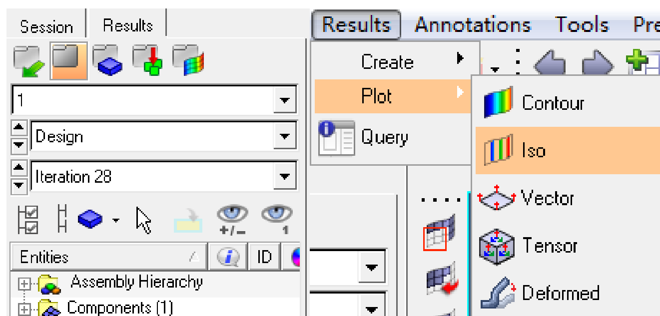


图 2−36　设置查看优化结果

（4）在 Results 下拉菜单里，选择 plot 下的 Iso 命令，如图 2−36 所示。

（5）在用户界面底部，在 Result type 下拉菜单中选择 Element Densities 命令。

（6）单击 Top 视图方向，设置正确的视图。

（7）单击 Apply 按钮。

（8）在 Current Value 处输入 0.3，按 Enter 键。

这样就只显示单元密度不小于 0.3 的单元，如图 2−37 所示。

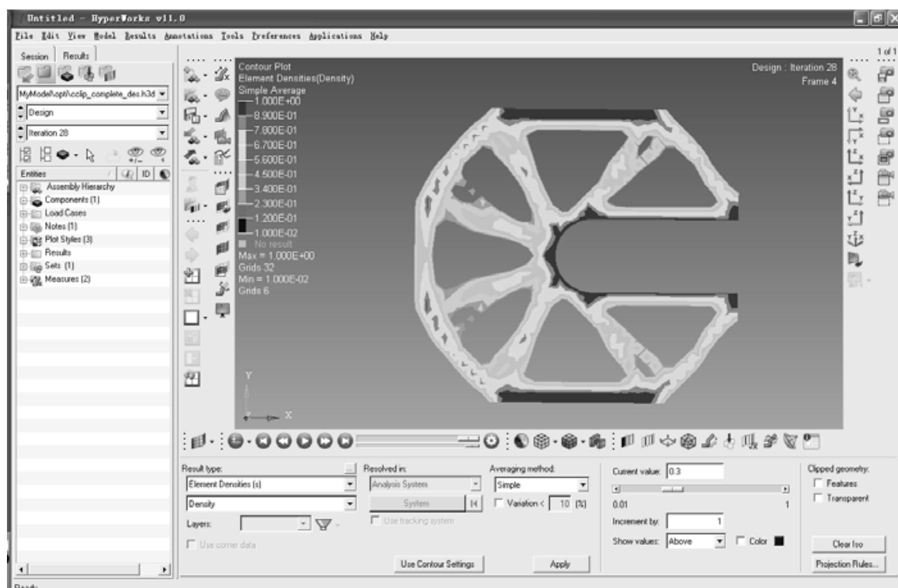


图 2−37　优化结果

（9）移动 Current Value 下方的滑动条，交互地查看单元密度改变时的形状，该工具能更好地从 OptiStruct 中观察材料分布和载荷传递路径。

STEP 17 对比初始结构和材料分布优化后结构的静力云图

（1）在 Hyperview 中，单击 Next Page 箭头，打开第二页，该页包含静力学分析最初和最终的两个迭代步结果，该结果保存在 cclip_complete_s1.h3d 文件中。

（2）利用 Page Window Layout 把用户窗口分成两个垂直窗口，如图 2–38 所示。



图 2–38　窗口分割

（3）利用 Top 对现行视图进行设置。

（4）在 Results 下拉菜单里，选择 plot 下的 Contour 命令。

（5）在用户界面底部，在 Result type 下拉菜单中选择 Displacement 命令，在 Displacement 下拉菜单中选择 Y，并单击 Apply 按钮。

（6）单击工具条上的 Deformed 按钮。

（7）在 Deformed shape 面板中的 value 处输入 100，把 Undeformed shape 下的 show 切换到 Edges，然后单击 Apply 按钮，如图 2–39 所示。

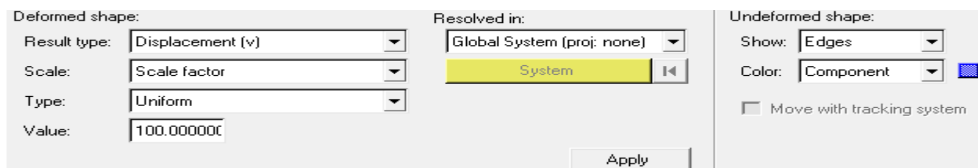


图 2–39　变形放大因数设置

（8）在 Edit 的下拉菜单中，单击 Copy 下的 Window 命令，然后单击上面创建的两个窗口中的空窗口。

（9）在 Edit 的下拉菜单中，单击 Paste 下的 Window 命令。

（10）切换动画模式到 Linear Static，如图 2–40 所示。

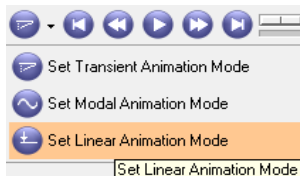


图 2–40　动画控制

（11）选中第二个窗口，在 Result 浏览器中切换到 Iteration28，如图 2–41 所示。

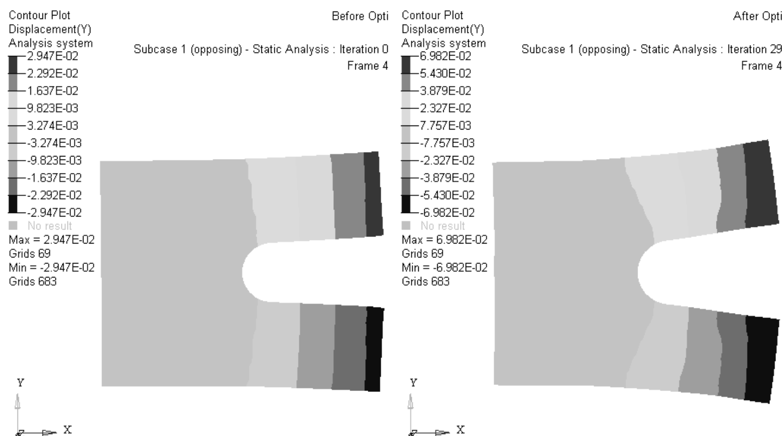


图 2–41　结果对比

（12）在 Edit 的下拉菜单中，单击 Copy 下的 Page 命令。

（13）在 Edit 的下拉菜单中，单击 Paste 下的 Page 命令。

（14）这样就在该报告中创建了第三页。

（15）单击第一个窗口，将其激活，然后单击 Contour 按钮。

（16）切换 result type 到 Element Stresses（2D & 3D）（t）。

（17）在 Averaging method 中选择 Simple，单击 Apply 按钮。

（18）用鼠标右键单击第一个窗口，选择 Apply Style 下的 Current Page 下的 Contour 命令，结果显示如图 2-42 所示。

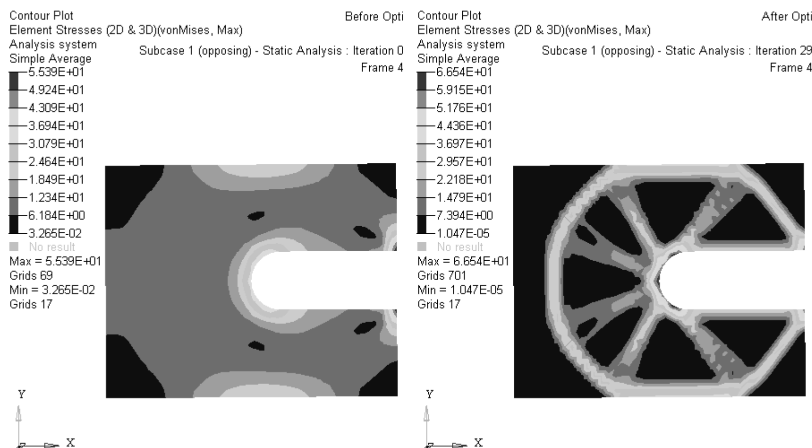


图 2-42　优化前后对比

这些应力结果仅为理解设计与限制的差距提供参考。牢记拓扑优化给你提供了一个概念设计，在接下来的设计阶段，应该考虑应力结果。

STEP 18 对比是否施加最小成员尺寸约束的等值面图

（1）单击“新建”按钮，增加页，这样就在该报告中创建了第四页。

（2）利用 Page Window Layout 把用户窗口分成两个垂向窗口。

（3）激活第一个窗口，然后单击，打开文件 cclip_complete_des.h3d。

（4）利用 Top 对现行视图进行设置。

（5）单击 Results 浏览器区域，选中最后一个迭代步 Iteration28，如图 2-43 所示。

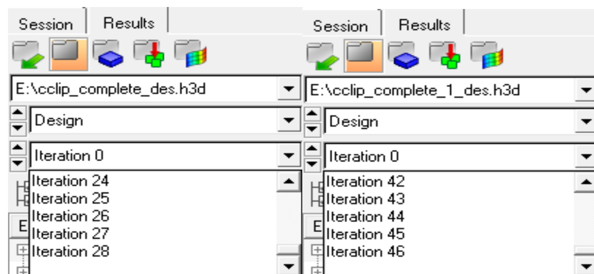


图 2-43　迭代步选择

（6）在 Results 下拉菜单里，选择 plot 下的 Iso 命令。

（7）按照图 2–44 设置 Result type 和 Averaging method，然后单击 Apply 按钮，接着调整 Current value 值为 0.3。

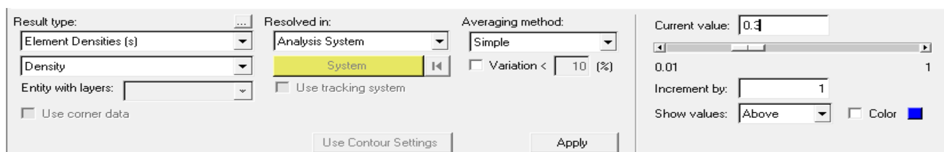
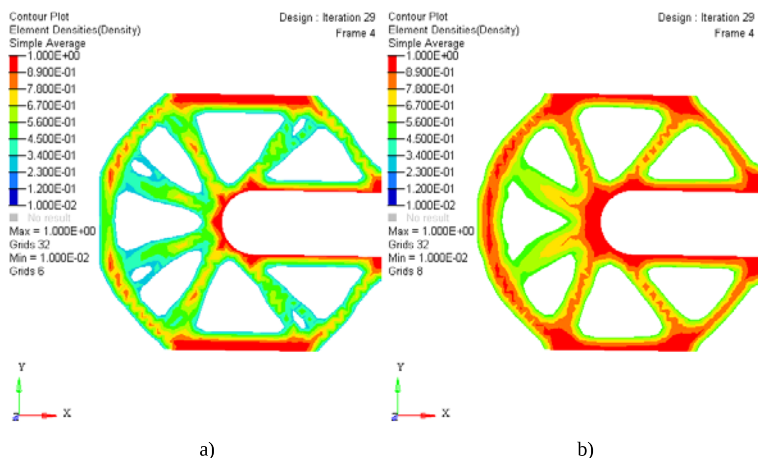


图 2–44　设置面板

激活第二个窗口，重复步骤（3）～（7），打开文件 cclip_complete_1_des.h3d，切换到最后一个迭代步 Iteration46，其他设置同上。

从图 2–45 中可以看出，经最小尺寸约束的优化更便于人们理解和加工。



a)　　　　　　　　b)

图 2–45　优化结果对比

a) 无最小成员尺寸约束的拓扑优化结果　b) 有最小成员尺寸约束后拓扑优化结果

2.3　实例：利用加强筋提高汽车挡板的固有频率

在本实例中，将利用加强筋对汽车挡板进行初步加固设计，达到通过利用拓扑优化技术在设计空间中布置加强筋的位置，以提高一阶模态固有频率的目的。模型如图 2–46 所示。

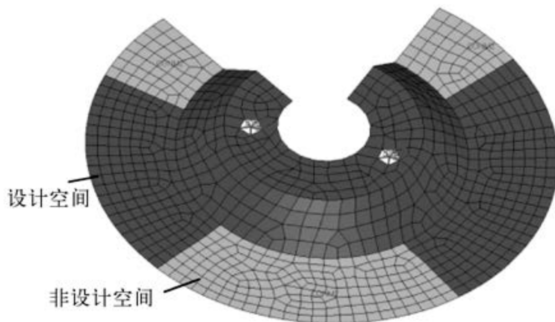


图 2–46　汽车挡板有限元模型

有限元单元网格包含可设计材料和不可设计材料。

优化问题描述如下。

- ✓ 目标：第一阶固有频率最大化。
- ✓ 约束：可设计部分体积上限为原体积的 30%。
- ✓ 设计变量：设计空间单元密度。

本实例包括以下内容：

- ✓ 在 HyperMesh 中设置模态分析。
- ✓ 在 HyperView 中查看初始后处理结果。
- ✓ 在 HyperMesh 中设置优化问题。
- ✓ 在 HyperView 中查看优化后处理结果。
- ✓ 在 HyperMesh 中设置最终模态分析。
- ✓ 在 HyperView 中查看最终后处理结果。
- ✓ 对比最终结果和初始结果。

STEP 01 打开 Hypermsh，加载用户配置，并载入文件

（1）打开 HyperMesh。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct，并单击 OK 按钮。

（3）可从工具栏中 Preferences 下拉菜单中找到 User Profiles。

（4）从工具栏中 File 下拉菜单中，选择 Import 命令。

（5）在用户的标签菜单中会增加标签 Import。

（6）设置 Import type 为 Import FE Mode。

（7）设置 File type 为 OptiStruct。

（8）单击 Select Files 按钮。

（9）在<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下选择文件 sshield_ opti.fem，并单击 open 按钮。

（10）单击 Import 按钮。

（11）载入 OptiStruct 输入文件 sshield_opti.fem 到 HyperMesh。

（12）单击 Close 按钮退出 Import 标签菜单。

STEP 02 创建一个卡片类型为特征根的载荷集合器 Load Collector

（1）在 Model Browser 窗口内用鼠标右键单击，选择 Create 子菜单并选择 LoadCollector。

（2）在 Name 文本框内输入 constraints。

（3）单击 Color，从调色板中选择一种颜色。

（4）在 Card Image 选项框，保留 Select type 为 none。

（5）单击 create 按钮。

（6）创建一个新的载荷集合器 constraints

（7）创建一个特征值的载荷集合器。

（8）在 Model Browser 窗口内用鼠标右键单击，选择 Create 子菜单并选择 LoadCollector。

（9）在 Name 文本框内输入 EIGRL。

（10）单击 Color，从调色板中选择一种不同的颜色。

（11）在 Card Image 选项框，选择 EIGRL。

（12）勾选 Card edit loadcollector upon creation 复选框并单击 create 按钮。

（13）弹出 EIGRL 卡片设置界面。如果方括号中的变量下面没有数字，则这个变量关闭。为了改变该情况，单击方括号中的变量，此时变量下方出现对象框，单击该框并输入所需的值。

（14）在 V2 处输入 3000.000。

（15）在 ND 处输入 2。

（16）单击 return 按钮，将这些改变保存到卡片中。

（17）刚才创建了一个载荷集合器，定义了用于实特征值分析（振动或屈曲）的数据，定义用于计算频率范围在 0～3 000Hz 的头两阶模态求解。

（18）单击 return 按钮回到主菜单。

STEP 03 在螺栓处创建约束

（1）在 Model Browser，展开 LoadCollectors，用鼠标右键单击 constraints，在弹出的菜单中单击 Make Current 命令。

载荷集合器名字加粗显示，代表它是现行的载荷集合器。

（2）从 Analysis 页，进入 constraints 面板。

（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（4）单击对象选择切换器，在弹出的菜单中选择 nodes。

（5）单击 nodes 按钮，选择 by id。

（6）在 id=中输入 1 075，按〈Enter〉键。

（7）在 id=中输入 1 076，按〈Enter〉键。

（8）约束所有自由度。

（9）勾选自由度旁边的复选框，则约束该自由度。如果不勾选，则释放该自由度。

Dofs 1，2，3 是沿 x，y，z 轴方向的线位移自由度。

Dofs 4，5，6 是绕 x，y，z 轴旋转的角自由度。

（10）单击 create 按钮。

（11）创建了两处约束。约束标记（三角形）出现在图形窗口已选节点处。在约束标记旁，显示数字 123456，表明约束了该节点处所有的自由度。

（12）单击 return 按钮回到主菜单。

STEP 04 创建载荷步 loadstep（也称为 subcase）

（1）从 Analysis 页，进入 loadstep 面板。

（2）在 name =处输入 frequencies。

（3）单击类型切换器，并在弹出的菜单中选择 normal modes 命令。

（4）勾选 SPC 前面的复选框。

（5）在 SPC 右侧出现一个对象栏。

（6）单击对象栏处的“=”号，在载荷集合器列表中选择 constraints。

（7）勾选 METHOD（STRUCT）前面的复选框。

（8）在 METHOD 右侧出现一个对象栏。

（9）单击对象栏处的“=”号，在载荷集合器列表中选择 eigrl。

（10）单击 create 按钮。

（11）利用载荷集合器 spc 中定义的约束和载荷集合器 eigrl 中提取的特征值，创建一个 RADIOSS 载荷步。

（12）单击 return 按钮回到主菜单。

STEP 05 分析计算

（1）从 Analysis 页，进入 RADIOSS 面板。

（2）单击 input file 后的 save as。

（3）弹出 Save file 浏览器窗口。

（4）选择想把 RADIOSS 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 sshield_analysis.fem。

（5）注意 RADIOSS 输入文件的拓展名为.fem 形式。

（6）单击 Save 按钮。

（7）注意到在 input file 栏中出现 sshield_analysis.fem 文件的名字和位置。

（8）单击 export options 切换到 all。

（9）单击 run options 切换到 analysis。

（10）单击 memory options 切换到 memory default。

（11）保持 options 栏为空。

（12）单击 Radioss 按钮。

（13）开始 RADIOSS 求解器的计算工作。如果计算成功，则 RADIOSS 模型所在文件夹将写入新的结果文件。用户可以在文件 sshield_analysis.out 中检查错误信息，如果有任何错误，则该文件可帮助检查输入卡。

STEP 06 在 HyperView 中查看第一阶模态振型

（1）在 Radioss 面板下，单击 HyperView 按钮。

（2）该按钮启动 HyperView，并载入与 sshield_analysis.h3d 文件相关的 sshield_analysis.mvw 文件片断。

（3）弹出的 Message Log 提示载入到 HyperView 的结果文件。

（4）单击 Close 按钮退出 Message Log 窗口。

（5）将动画类型从 Transient 转换到 Modal。

（6）单击如图 2-47 所示的 Results Browser 中的下拉菜单，列表中显示已计算出在 0～3 000Hz 范围内的头两阶固有频率。

（7）单击 Mode 1，选择模态结果。

（8）单击工具条上的按钮 Deformed。

确保 Deformed 面板中的设置如表 2-2 所示。

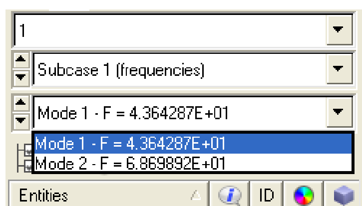


图 2-47　模态选择

表 2-2　Deform 设置

Result Type	Eigen mode（v）
Scale	Model Units
Type	Uniform
Value	10

（9）单击 Apply 按钮。

（10）单击工具条上的 Animation Controls 按钮。

（11）在 1～60 移动滚动条 Max Frame Rate，以提高或降低动画速度。

（12）用户可以改变 Angular Increment 的默认值去定义动画。

（13）单击 Play/Pause Animation 按钮，启动动画。

（14）看到对应于第一阶频率的模态振型动画。

（15）再次单击 Play/Pause Animation 按钮，停止动画。

（16）从 File 下拉菜单中，选择 Exit 命令退出 HyperView。

（17）单击 No 按钮，关闭程序。

（18）在 HyperMesh 中设置优化问题。

STEP 07　在拓扑优化中创建设计变量

（1）回到 HyperMesh，单击 return 按钮退出 Radioss 面板。

（2）从 Analysis 页，进入 optimization 面板。

（3）进入 topology 面板。

（4）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（5）单击 desvar =处输入 shield。

（6）单击 props 按钮。

（7）勾选 design 旁的复选框，单击 select 按钮。

（8）切换 type 到 PSHELL。

（9）单击 base thickness =输入 0.300。

（10）单击 create 按钮。

（11）已创建了拓扑设计空间 shield。属性集合器 design 中的所有单元（即组件集合器 design 内的所有单元）均包含在拓扑设计空间。这些壳单元的厚度变化范围在 0.3（上面定

义的基本厚度）到最大厚度（已在 PSHELL 卡片中定义的厚度）。

这样做的目的是为了确定设计区域中加强筋的放置位置，所以定义了一个非零的厚度，它作为壳的初始厚度。在 PSHELL 卡片中定义的最大厚度，即为加强筋的允许深度。

现在 PSHELL 卡片中壳的初始厚度值仍为 0.3，需将其改为 1.0，这样通过拓扑优化加强筋的最大高度可为 0.7。

（12）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

（13）单击工具条中的 Card Editor 按钮。

（14）利用所列对象旁的下拉箭头，设置对象选择为 props，即 props 。

（15）单击 props 按钮，并勾选 design 旁的复选框。

（16）单击 select 按钮。

（17）选择 card image=，并从弹出的菜单中选择 PSHELL。

（18）单击 edit 按钮。

（19）进入 PSHELL 卡片设置面板。

（20）将 T 栏中的值从 0.3 改为 1.000。

（21）单击 return 按钮，保存对卡片设置的改变。

（22）单击 return 按钮，退出 Card Editor 面板。

（23）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

STEP 08 创建响应

（1）在 OptiStruct User's Guide 下的 Responses 可以查到关于可用响应的具体描述。

（2）在该处定义两个响应：第一个响应为 frequency（频率），用于定义目标函数。第二个响应为 volume fraction（体积百分数），用于定义约束。

（3）选择 responses 面板。

（4）在 response =处输入 freq1。

（5）单击 response type 下的转换按钮，选择从弹出菜单中选择 frequency。

（6）在 Mode Number 上单击，输入 1 （它是个默认值）。

（7）单击 create 按钮。

（8）响应 freq1 为从第一阶模态提取的频率。

（9）在 response =处输入 volfrac。

（10）单击 response type 下的转换按钮，选择从弹出的菜单中选择 volumefrac。

（11）切换 total/regional 到 total。

（12）单击 create 按钮。

（13）响应 volfrac 为设计空间的体积百分比。

（14）单击 return 按钮，回到 Optimization Setup 面板。

STEP 09 定义目标函数

（1）在本实例中，目标是使已定义的响应 freq1 最大化。

（2）进入 optimization 面板下的 objective 面板。
（3）单击面板左上角的转换器，从弹出的菜单中选择 max。
（4）单击 response=，从已有响应列表中选择 freq1。
（5）单击 loadstep 选择已定义的载荷步 frequencies。
（6）单击 create 按钮。
（7）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

STEP 10 定义约束

不能约束已定义为目标的响应。在本实例中，不能约束响应 freq1。
（1）进入 optimization 面板下的 dconstraints 面板。
（2）在 constraint=处输入 volume_constr。
（3）勾选 upper bound =左侧的复选框。
（4）在 upper bound =处输入 0.40。
（5）单击 response=，从已有响应列表中选择 volfrac。
（6）单击 create 按钮。
（7）在响应 volfrac 上定义约束。该约束的上限值为 0.40。因为 volumefrac（体积百分比）是个全局的响应，所以该约束适用于所有的工况。在本实例中，拓扑优化利用体积生成加强筋。
（8）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

STEP 11 优化求解

（1）在 Analysis 页，进入 OptiStruct 面板
（2）单击 input file 后的 save as 按钮。
（3）选择想把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 sshield_optimization.fem。
（4）使用 OptiStruct 文件拓展名.fem。
（5）单击 Save 按钮。
注意在 input file 栏中出现 sshield_optimization.fem 文件的名字和位置。
（6）单击 export options：切换到 all。
（7）单击 run options：切换到 optimization。
（8）单击 memory options：切换到 memory default。
（9）单击 OptiStruct。
开始 OptiStruct 求解器的计算工作。如果计算成功，则 OptiStruct 模型所在文件夹将写入新的结果文件。用户可以在文件 sshield_optimization.out 中检查错误信息，如果有任何错误，则该文件可帮助检查输入卡。
在该文件所在的目录中存在表 2-3 中的文件。

表 2-3　优化结果文件列表

sshield_optimization.hgdata	HyperGraph 文件包括每次迭代的目标函数、欠约束百分比及约束的数据
sshield_optimization.his_data	OptiStruct 记录文件包括每次迭代的迭代数、目标函数值及欠约束百分比
sshield_optimization.HM.comp.cmf	根据单元密度的结果将单元组织到组件中的 HyperMesh 命令文件。该文件只产生于拓扑优化运行时
sshield_optimization.HM.ent.cmf	根据单元密度的结果将单元组织到对象集的 HyperMesh 命令文件。该文件只产生于拓扑优化运行时
sshield_optimization.html	HTML 格式的优化报告，总结了问题描述和分析结果
sshield_optimization.oss	OSSmooth 文件默认为 0.3 的密度阈值。用户可以在文件中编辑该参数，以获得所需的结果
sshield_optimization.out	包含有文件配置的信息，优化问题配置的信息，对计算所需的内存和硬盘空间进行的评价，每次优化迭代的信息及计算时间信息的 OptiStruct 的输出文件。从该文件中可以检查在优化结果文件生成过程中出现的警告和错误
sshield_optimization.sh	最后迭代所产生形状的文件。它包括分析中每个单元的材料密度，无用的尺寸参数及方位角。该文件可用于重新开始一个计算，如果需要，为拓扑优化运行 OSSmooth 文件
sshield_optimization.stat	总结分析进程，为分析过程的每步提供 CPU 信息
sshield_optimization.mvw	HyperView 会话文件
sshield_optimization_frames.html	HTML 文件用于在浏览器中利用 HyperView Player 对.h3d 进行后处理。它与_menu.html 文件相关联
sshield_optimization_menu.html	HTML 文件在浏览器中利用 HyperView Player 对.h3d 进行后处理
sshield_optimization_des.h3d	HyperView 二进制结果文件，包含拓扑优化的 Density（密度）结果，形貌优化或形状优化的 Shape（形状）结果，及尺寸优化和拓扑优化的 Thickness（厚度）结果
sshield_optimization_s1.h3d	HyperView 二进制结果文件，包含线性静力学分析的 Displacement（位移）结果，模态分析的 Element Strain Energy（单元应变能）结果，及线性静力学分析的 Stress（应力）结果等

STEP 12　查看优化结果

OptiStruct 输出所有迭代步中经拓扑优化的壳单元的单元密度和厚度结果。另外，默认输出第一迭代步和最后一个迭代步的特征向量结果。下面的内容描述如何在 HyperView 中查看这些结果。

（1）在 OptiStruct 面板下，单击 HyperView 按钮。

（2）启动 HyperView，载入文件 sshield_optimization.mvw。该文件与 sshield_optimization_des.h3d 和 sshield_optimization_s1.h3d 相关联。

（3）弹出的 Message Log（信息提示）窗口，显示.h3d 文件的位置。

（4）单击 Close 按钮，退出 Message Log 窗口。

（5）通过单击工具条上的 Contour 按钮，进入 contour 面板。

（6）将 Result type 设为 Element Thickness（s）。

（7）单击 Apply 按钮。

（8）从 Results Browser 中，选择最后一个迭代步，如图 2-48 所示。

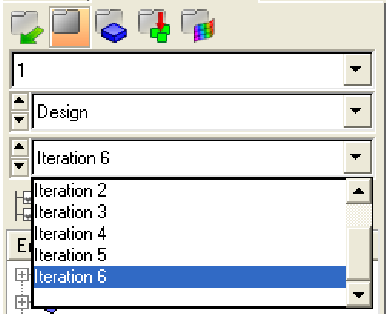


图 2-48　选择迭代步

（9）分配给模型中的每个单元的图例颜色，表明已选迭代步下每个单元的厚度。

是否大部分单元厚度聚集在 1 或 0 呢？

如果很多单元处于中间密度（表现为中间厚度），那么需要调整离散参数。DISCRETE（离散）参数（在 optimization 面板下的 opti control 面板中设置）使得处于中间密度的单元移向两端 1 或 0，这样产生更加离散化的结构。

密度趋于 1.0 的区域需要加固，密度趋于 0.0 的区域可以删除。

是否 max =栏处显示=1.0e+00?

如果显示 1.0，则保持不变；如果不是，还需要继续优化。允许更多步迭代或减小 OBJTOL 参数（可在 opti control 面板中设置）。

如果调整了参数 DISCRETE，合并检查面板的控制，重新定义网格，和（或）减小了目标容差仍然无法得到一个更加离散的方案（没有单元密度达到 1.0），用户可能需要检查一下优化问题的设置情况。对于给定的目标函数，一些定义的约束可能无法达到，反之亦然。

那么，将在哪里放置加强筋呢?

图 2−49 为在第 12 迭代步时，除可设计组件关闭外所有组件内单元的密度云图。

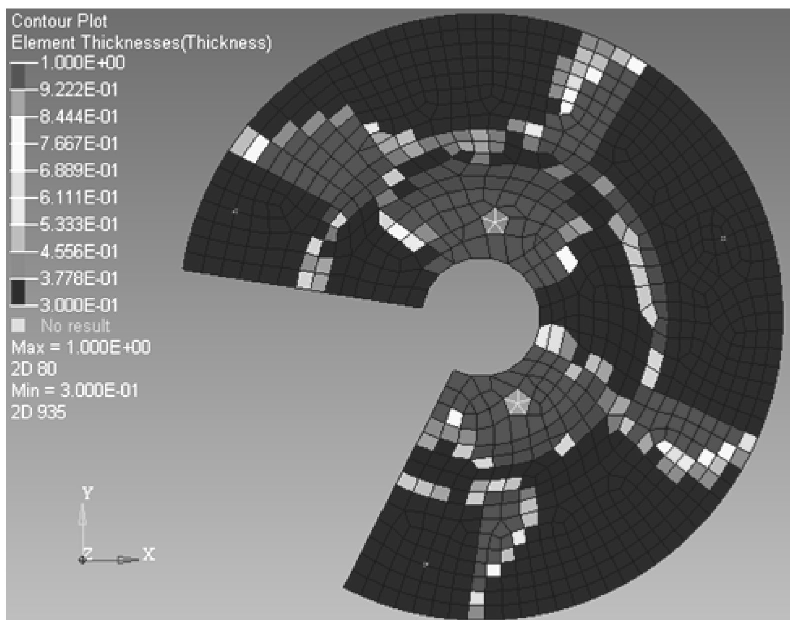


图 2−49　单元密度云图

（10）单击 File 菜单，选择 Exit 命令，退出 HyperView。

（11）在 HyperMesh 中设置最终模态分析。

基于已获得的拓扑优化结果，在模型中增加了很多加强筋。包含这些加强筋的新设计 sshield_newdesign.fem，位于< Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optisruct/中。

STEP 13 删除现有模型

（1）回到 HyperMesh，单击 return 按钮，退出 OptiStruct 面板。

（2）在 Tool 页，进入 delete 面板。

（3）或按快捷键〈F2〉，跳到 delete 页面。

（4）单击 delete model。

（5）信息提示弹出，询问“if you want to delete the current model”（是否要删除现有模型）。

（6）单击 Yes 按钮。

（7）删除现有模型，清空了 HyperMesh 现有的数据库。存储在用户硬盘上的.hm 文件中的信息不受影响。

（8）单击 return 按钮，回到主菜单。

STEP 14 导入 OptiStruct 输入文件 sshield_newdesign.fem

（1）单击 File 菜单，选择 Import 命令。

（2）设置 Import type 为 Import FE Mode。

（3）设置 File type 为 OptiStruct。

（4）选择 Files 按钮。

（5）在 <Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct/ 下选择文件 sshield_newdesign.fem，并单击 open。

（6）单击 Import。

载入 OptiStruct 输入文件 sshield_newdesign.fem 到 HyperMesh。模型如图 2-50 所示。增加的加强筋放到 ribs 的组件集合器中。

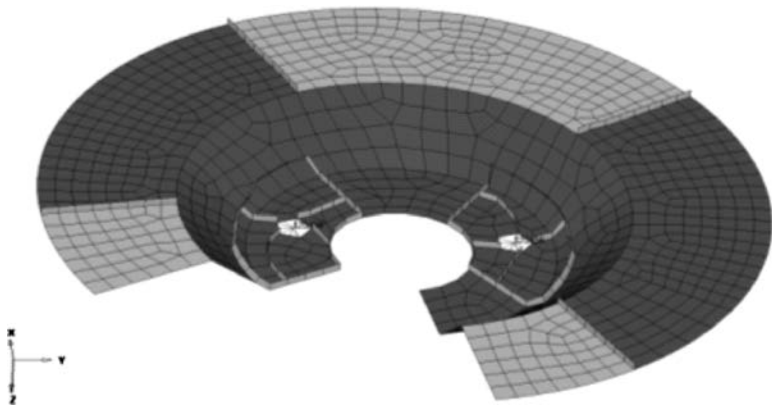


图 2-50 修改后的模型

（7）单击 Close 按钮。

STEP 15 分析计算

（1）从 Analysis 页，进入 Radioss 面板。

（2）单击 input file 后的 save as 按钮。

（3）选择想把 RADIOSS 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 sshield_newdesign.fem。

（4）单击 Save 按钮。

（5）注意到在 input file 栏中出现 sshield_newdesign.fem 文件的名字和位置。

（6）单击 export options 切换到 all。

（7）单击 run options 切换到 analysis。

（8）单击 memory options 切换到 memory default。

（9）保持 options 栏为空。

（10）单击 Radioss。

STEP 16 查看模态振型

（1）在 Radioss 面板下，单击 HyperView 按钮。

（2）该按钮启动 HyperView，并载入与 sshield_newdesign.h3d 文件相关的 sshield_newdesign.mvw 文件片断。

（3）弹出的 Message Log 窗口，显示.h3d 文件的位置。

（4）单击 Close 按钮退出 Message Log 窗口。

（5）将动画类型设置为 Modal 。

（6）在 Results Browser 中，选择 Mode 1。

（7）单击工具条上的 Deformed 按钮。

（8）确保 Deformed 面板中的设置如表 2-4 所示。

（9）单击 Apply 按钮。

（10）单击 Play/Pause Animation 按钮，启动动画。

看到对应于第一阶频率的模态振型动画。

（11）再次单击 Play/Pause Animation 按钮，停止动画。

（12）对比最终结果和初始结果。

第一阶模态的频率增加的百分比是多少（sshield_analysis.fem 与 sshield_newdesign 相比）？

表 2-4 Deformed 参数设置

Result Type	Eigen mode （v）
Scale	Model Units
Type	Uniform
Value	10

我们看到第一阶模态的频率从 43.63Hz 增加到 84.88 Hz。

该部分质量增加了多少？（在 Tool 页中的 mass calc 面板中查看 ribs 的质量。）。

质量增加了多少百分比?

2.4 实例：汽车控制臂的概念设计

本实例利用 OptiStruct 的拓扑优化功能完成一个满足特定要求的汽车控制臂概念设计。图 2-51 显示的有限元网格包括可设计区域和非可设计区域。零件具体的要求包括在 3 种工

况下载荷施加点的合成位移相应地为 0.05mm，0.02mm 和 0.04mm。优化设计尽可能减小材料的使用。优化模型如图 2−51 所示。

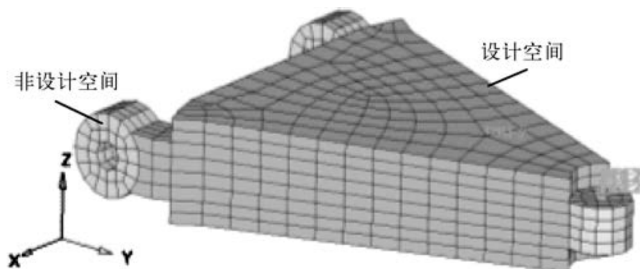


图 2−51　有限元模型

将由可设计和非可设计材料构成的有限元模型导入到 HyperMesh，定义合适的材料、边界条件、载荷及优化参数，然后利用 OptiStruct 软件确定优化的材料分布。其结果（即材料分布）可以通过设计空间中密度值经归一化在 0.0～1.0 变化的云图中进行查看。等值线图也可用于查看密度结果。密度值趋于 1.0 的区域需要加固。

在完成优化分析后，对另外一个模型在其他设置相同的情况下，考虑对称和拔模问题，根据模型的优化结果，加深对优化设置的认识。

优化问题描述如下。

✓ 目标：体积最小化。

✓ 约束：工况 1——载荷作用点的合成位移上限为 0.05mm。

工况 2——载荷作用点的合成位移上限为 0.02mm。

工况 3——载荷作用点的合成位移上限为 0.04mm。

✓ 变量：设计空间中每个单元的密度（和相应的单元刚度）。

本实例包括以下内容：

✓ 在 HyperMesh 中设置有限元模型。

✓ 在 HyperMesh 中进行优化设置。

✓ 在 HyperView 中查看后处理结果。

✓ 进行拓扑优化的同时，进行对称和拔模方向约束。

STEP 01 打开 HyperMesh，加载用户配置，并载入文件

（1）打开 HyperMesh。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct，并单击 OK 按钮。

这样就加载了 RADIOSS/Bulk 和 Optistruct 所对应的 Hypermesh 设置。在用户界面中，通过工具条中的下拉菜单 Preferences 可以找到 User Profiles。

（3）单击 File 菜单，选择 Import 命令。

（4）在<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct/ 下选择文件 carm.hm。

（5）单击 Open 按钮。

STEP 02 创建材料和属性，并分配给合适的组件

（1）单击标签菜单上的 Model 标签。

（2）在 Model Browser（模型浏览窗口）中单击鼠标右键，移动光标至 Create，激活其二级菜单并单击 Material。

（3）在 Name 栏处输入 Steel。

（4）在 Card Image 选项框中选择 MAT1 作为材料类型。

（5）勾选 Card edit material upon creation 复选框，并单击 create 按钮。

（6）弹出 MAT1 卡片设置框。

（7）在 E 处输入 2.0E5。

（8）在 Nu 处输入 0.3。

（9）单击 return 按钮。

（10）在 Model Browser（模型浏览窗口）中单击鼠标右键，移动光标至 Create，激活其二级菜单并单击 Property。

（11）在 Name 处输入 design_prop。

（12）在 Card Image 选项框中选择 PSOLID 作为属性类型。

（13）选择 Material 标签。

（14）勾选 Assign material，从 Name 下拉菜单中选择 Steel 作为材料。

（15）返回 Property 标签，单击 create 按钮。

（16）在 Model Browser（模型浏览窗口）中单击鼠标右键，移动光标至 Create，激活其二级菜单并单击 Property。

（17）在 Name 处输入 nondesign_prop。

（18）在 Card Image 选项框中选择 PSOLID 作为属性类型。

（19）设置 Material 为 Steel。

（20）单击 create 按钮。

（21）单击 Components 按钮，利用新创建的属性更新组件集合器。

（22）选择 assign 按钮。

（23）单击 comps，勾选 nondesign，并单击 select。

（24）单击 property =，选择 nondesign_prop。

（25）单击 assign。

（26）重复步骤（21）～（24）将属性 design_prop 分配给组件 design。

（27）单击 return 按钮。

STEP 03 创建载荷集合器

下面创建 4 个载荷集合器（SPC、Brake、Corner 和 Pothole），并分别赋给不同的颜色。按照下面的操作创建每个载荷集合器。

（1）在 Model Browser（模型浏览窗口）中单击鼠标右键，移动光标至 Create，激活其

二级菜单并单击选 LoadCollector。

（2）在 Name 处输入 SPC。

（3）不要按键盘上的〈Enter〉键，直到全部完成。

（4）保持 Card image 栏为 None。

（5）选择一个合适的颜色。

（6）单击 create 按钮。

（7）同样的，创建名叫 Brake、Corner 和 Pothole 的载荷集合器。

STEP 04 施加约束

需要创建约束，并按照下面的 Step 把它们赋给载荷集合器 SPC。

（1）从 Model Browser 中，展开 LoadCollectors，用鼠标右键单击 SPC，选择 Make Current。

（2）从 Analysis 页，进入 constraints 面板。

（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（4）确认 load types（载荷类型）为 SPC。

（5）在图形窗口中，选择衬套一端的节点，如图 2−52 所示。

（6）约束 dof1，dof2，dof3，确保勾选 dofs 1，dofs 2，dofs 3，不勾选 dofs 4，dofs 5，dofs 6。

（7）勾选自由度旁的复选框，则约束该自由度；不勾选，则释放该自由度。

dofs 1，dofs 2，dofs 3 是沿 *x*，*y*，*z* 轴方向的线位移自由度。

dofs 4，dofs 5，dofs 6 是绕 *x*，*y*，*z* 轴旋转的角自由度。

（8）单击 create 按钮。

（9）创建一个约束。约束标记（三角形）出现在图形窗口已选节点处。在约束标记旁，显示数字 123，表明约束了该节点处自由度 1、2、3。

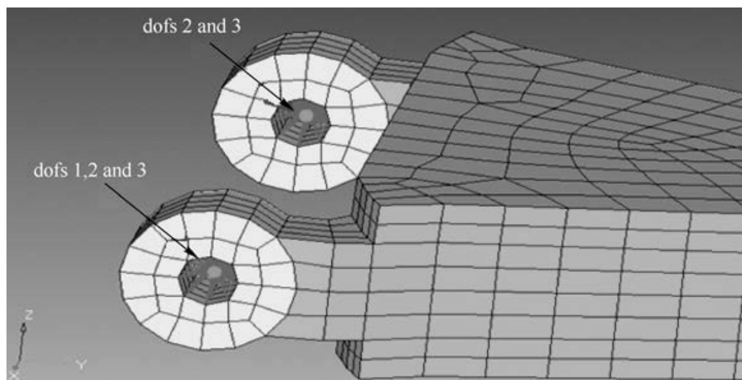


图 2−52　约束创建

（10）约束衬套一端部节点的自由度 dof1，dof2，dof3。

（11）在图形窗口中，选择衬套另一端的节点，如图 2−53 所示。

（12）约束 dof2 与 dof3，确保勾选 dof2 和 3。

（13）单击 create 按钮。

（14）创建一个约束。约束标记（三角形）出现在图形窗口已选节点处。在约束标记旁，显示数字 23，表明约束了该节点处自由度 2、3。

（15）单击 nodes，在拓展的对象选择窗口中选择 by id。

（16）输入 3239，按〈Enter〉键。

（17）选择的节点为 3239，如图 2-54 所示，该处对应着减振器的装配位置。

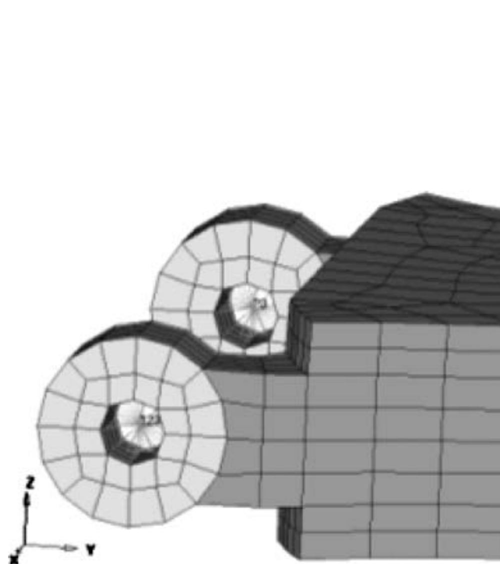


图 2-53 查看约束

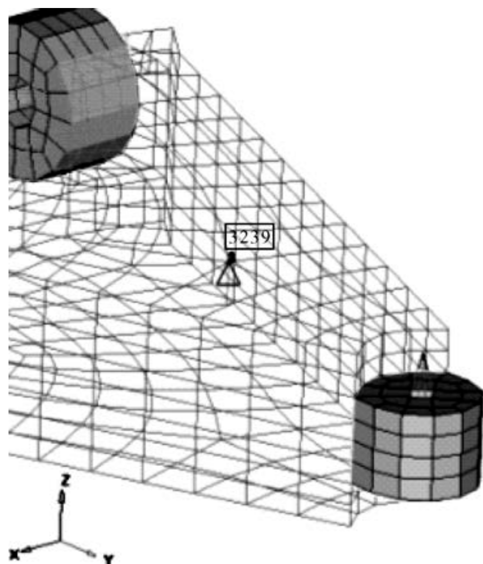


图 2-54 约束创建

（18）只约束 dof3。

（19）单击 create 按钮。

（20）创建一个约束。约束标记（三角形）出现在图形窗口已选节点处。在约束标记旁，显示数字 3，表明约束了该节点处自由度 3。

（21）约束节点 3239 的 dof3。

（22）单击 return 按钮，回到主菜单。

STEP 05 为载荷 Brake、Corner 和 Pothole 创建集中力

（1）从 the Model Browser 中展开 LoadCollectors，用鼠标右键单击 Brake，选择 Make Current。

（2）从 Analysis 页，选择 forces 面板。

（3）单击 nodes，在拓展的对象选择窗口中选择 by id。

（4）输入节点号 2699，按〈Enter〉键，选择了加载集中力的节点。

（5）单击 magnitude=输入 1000.0，并按〈Enter〉键。

（6）设置转换器到 x-axis。

（7）单击 create 按钮。

（8）在屏幕上，节点处出现指向 X 方向的箭头。

（9）为更好地查看箭头，选择 uniform size=输入 100，并按〈Enter〉键。

（10）从 the Model Browser 中，在展开的 LoadCollectors 下，用鼠标右键单击 Corner，并选择 Make Current。

（11）单击 nodes，并在拓展的对象选择窗口中选择 by id。

（12）输入节点号 2699，按〈Enter〉键。

（13）单击 magnitude=输入 1000.0，并按〈Enter〉键。

（14）设置转换器到 y-axis。

（15）单击 create 按钮。

（16）在屏幕上，节点处出现指向 Y 方向的箭头。

（17）从 the Model Browser 中，在展开的 LoadCollectors 下，用鼠标右键单击 Pothole，并选择 Make Current。

（18）单击 nodes，并在拓展的对象选择窗口中选择 by id。

（19）输入节点号 2699，按〈Enter〉键。

（20）单击 magnitude=输入 1000.0，并按〈Enter〉键。

（21）设置转换器到 z-axis。

（22）单击 create 按钮。

在屏幕上，节点处出现指向 Z 方向的箭头，如图 2−55 所示。

（23）单击 return 按钮，返回 Analysis 页。

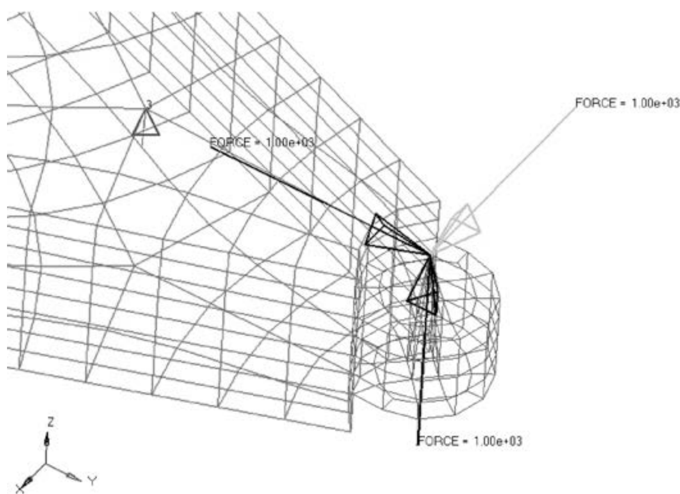


图 2−55　模型载荷

STEP 06 创建工况 Brake、Corner 和 Pothole

建立边界条件的最后一步是创建子工况。

（1）从 the Analysis 页，进入 loadsteps 面板。

（2）单击 name=输入 Brake，并按〈Enter〉键。

（3）选择 type 为 linear static。

（4）勾选 SPC 前的复选框。

（5）SPC 右侧出现一个对象栏。

（6）单击该栏，从已有载荷集合器中选择 SPC。

（7）勾选 Load 前的复选框，并从已有载荷集合器中选择 Brake。

（8）单击 create 按钮。

（9）同样的，创建载荷工况 Corner [选择载荷集合器 Corner 和 SPC] 和 Pothole [选择载荷集合器 Pothole and SPC]。

（10）单击 return 按钮，返回 Analysis 页。

（11）在 HyperMesh 中进行优化设置。

STEP 07 定义拓扑优化设计变量

（1）从 Analysis 页，进入 optimization 面板。

（2）进入 topology 面板。

（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（4）单击 DESVAR=输入 gn_prop，并按〈Enter〉键。

（5）单击 props props，从已有属性列表中选择 design_prop，并单击 select 按钮。

（6）选择 type 为 PSOLID。

（7）单击 create 按钮。

（8）创建拓扑设计空间 design_prop。所有具有设计属性的单元均包含在该设计空间中。

（9）单击 return 按钮，回到 Optimization 页面。

STEP 08 创建体积和位移响应

（1）进入 responses 面板。

（2）单击 response =输入 vol。

（3）单击 response type 下的切换器，从弹出的菜单中选择 volume。

（4）确保 regional 选项处于 total （默认情况下）。

（5）单击 create 按钮。

（6）定义模型的总体积响应 vol。

（7）单击 response =输入 disp1。

（8）单击 response type 下的切换器，从弹出的菜单中选择 static displacement。

（9）单击 nodes，在拓展的对象选择窗口中选择 by id。

（10）输入 2699，按〈Enter〉键。

（11）选择施加 3 个集中力的节点。
（12）选择 total disp。
（13）它是 *x*，*y* 和 *z* 方向位置的合成。
（14）单击 create 按钮。
（15）定义节点 2699 的总位移响应 disp1。
（16）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

STEP 09 定义目标

（1）进入 the objective 页。
（2）单击面板左上角的转换器，从弹出的菜单中选择 min。
（3）单击 response=并选择 Vol。
（4）单击 create 按钮。
（5）单击 return 按钮，退出 optimization 面板。

STEP 10 创建位移响应的约束

（1）设置该分析中约束的上限和下限。
（2）进入 dconstraints 面板。
（3）单击 constraint=输入 constr1。
（4）勾选 upper bound =左侧的复选框。
（5）单击 upper bound=输入 0.05。
（6）选择 response=设置为 disp1。
（7）单击 loadsteps。
（8）勾选 Brake 旁边的复选框。
（9）单击 select 按钮。
（10）单击 create 按钮。
（11）单击 constraint=输入 constr2。
（12）勾选 upper bound =左侧的复选框。
（13）单击 upper bound=并输入 0.02。
（14）选择 response=设置为 Corner。
（15）单击 create 按钮。
（16）单击 constraint=并输入 constr3。
（17）只勾选 upper bound =左侧的复选框。
（18）单击 upper bound=并输入 0.04。
（19）选择 response=设置为 Pothole。
（20）单击 create 按钮。
（21）单击 return 按钮两次，返回主菜单。

STEP 11 检查优化问题

当运行检查时，OptiStruct 将评估计算模型所需的内存和硬盘空间。在运行检查时，OptiStruct 浏览卡片，检查分析或优化运行时所需的全部信息，以及信息是否冲突。

（1）从 the Analysis 页，进入 OptiStruct 面板。

（2）单击 input file 后的 save as 按钮。

（3）选择想把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 carm_check.fem。

（4）使用文件拓展名.fem 作为 OptiStruct 输入卡。

（5）单击 Save 按钮。

（6）注意在 input file 栏中出现 carm_check.fem 文件的名字和位置。

（7）单击 export options 切换到 all。

（8）单击 run options 切换到 check。

（9）单击 memory options 切换到 memory default。

（10）单击 OptiStruct。

OptiStruct 开始运行检查。如果计算成功， OptiStruct 模型所在文件夹将写入新的结果文件。用户可以在文件 sshield_optimization.out 中检查错误信息，如有任何错误，该文件可帮助检查输入卡。

一旦进程完成（在 UNIX 或 Windows 弹出的命令框中显示），就可以查看文件 carm_check.out。该文件包含有文件配置的信息、优化问题配置的信息、对计算所需的内存和硬盘空间进行的评价、每次优化迭代的信息及计算时间信息的 OptiStruct 的输出文件。从该文件中可以检查在优化结果文件生成过程中出现的警告和错误。

是否优化问题设置正确？从 carm_check.out 中查看优化问题参数段。

是否目标函数正确？从 carm_check.out 中查看优化问题参数段。

约束呢? 从 carm_check.out 中查看优化问题参数段。

求解推荐的内存量是多大？从 carm_check.out 中查看内存评估信息段。

为运行优化，硬盘空间是否足够？从 carm_check.out 中查看硬盘空间评估信息段。

STEP 12 优化分析计算

（1）从 Analysis 页，进入 OptiStruct 面板。

（2）单击 input file 后的 save as 按钮，输入 carm_complete.fem。

（3）单击 run options 切换到 optimization。

（4）单击 OptiStruct，开始优化分析计算。

（5）完成分析时，窗口中出现下面的提示信息：

OPTIMIZATION HAS CONVERGED。

FEASIBLE DESIGN （ALL CONSTRAINTS SATISFIED）。

OptiStruct 也会报告产生的错误信息。用文本编辑器打开文件 carm_complete.out，从中

可以找到关于任何错误的详细信息。该文件和.fem 文件保存在同一个文件夹下。

关闭 DOS 窗口或 shell，单击 return 按钮。

STEP 13 查看结构变形

文件 carm_complete_des.h3d 中包含了 OptiStruct 全部迭代步中的单元密度结果信息。另外，默认情况下，carm_complete_s#.h3d 文件包含每个工况中第一迭代步和最后一迭代步的位移和应力结果，其中，#代表工况号。该部分描述如何在 HyperView 中查看这些结果。

一旦在命令窗中看到提示信息 OPTIMIZATION HAS CONVERGED，就单击 HyperView 按钮。

（1）启动 HyperView，载入计算结果。出现信息窗口，提示成功加载模型文件和结果文件到 HyperView。注意 3 个.h3d 文件分别载入到 HyperView 的不同页中。

（2）单击 Close 按钮，关闭信息窗口。

（3）通过查看模型变形，可以帮助检查边界条件定义的是否正确，并找出是否模型变形像预期的那样。分析结果在第二～四页。第一页是优化结果。

（4）单击工具条上的 Next Page 按钮，移到第 2 页。

（5）第二页是从文件 the carm_complete_s1.h3d 中读入的结果。注意到类似 Subcase 1 – Brake 的页名显示，表明对应工况 1 的结果。

（6）选择 Linear Static 作为动画模式。

（7）单击工具条上的 Contour 按钮。

（8）选择 Result type 下面的第一个下拉菜单，选择 Displacement [v]。

（9）从第二个下拉菜单中，选择 Mag。

（10）单击 Apply 按钮，显示位移云图。

（11）单击工具条上的 Deformed 按钮。

（12）将 Result type 设置为 Displacement（v），Scale 设置为 model units，Type 设置为 Uniform。

（13）在 value 处输入 10。这表明最大位移量变为 10（模型单位），所有的位移都成比例变化。

（14）单击 Undeformed shape 下方靠近 Show 的下拉菜单，选择 Wireframe。

（15）单击 Apply 按钮。

（16）看到覆盖在未变形模型网格上的位移变形云图。

（17）单击 Start/Pause Animation 按钮，开始演示模型动画。

看到工况 1（制动）下的变形动画演示。

在工况 1 下，载荷施加在哪个方向上?

哪些节点的自由度被约束?

对于在网格上的施加边界条件，模型变形是否正确?

在 Results Browser 中，选择 Iteration 18，如图 2-56 所示。

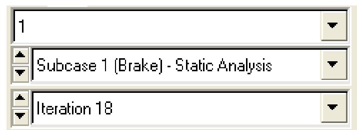


图 2-56　选择迭代步

现在的云图显示的是工况 1 的第 18 步迭代（优化迭代的最后一步）后的位移结果。

（18）单击，停止动画。

（19）单击工具条上的 Next Page 按钮，移到第三页。

第三页是从文件 the carm_complete_s2.h3d 中读入的结果。注意到类似 Subcase 2– Brake 的页名显示，表明对应工况 2 的结果。

（20）重复以上操作，显示在工况 2 作用下模型的位移云图和变形。

看到工况 2 下的变形动画演示?

哪些节点的自由度被约束?

对于在网格上的施加边界条件，模型变形是否正确?

（21）同样的情况下，查看工况 3 下的位移和变形。

STEP 14 查看密度结果云图

第一页是优化迭代结果（单元密度）。

（1）单击 Previous Page 按钮，直到出现页名是 Design History，表明此时对应优化迭代的结果。

（2）单击工具条下的 Contour 按钮。

注意：Result type 是 Element Densities [s]，它是文件_des.h3d 中唯一的结果类型。

（3）第二个下拉菜单显示 Density。

（4）在 Averaging method 处，选择 Simple。

（5）单击 Apply 按钮，显示密度云图。

（6）注意到云图全部是蓝色的，这是因为现在是第 0 个迭代步的结果，为经优化的初始设计。

（7）在 Results Browser 处，选择 Iteration 18。

分配给模型中的每个单元的图例颜色，表明已选迭代步下每个单元的厚度。

是否用户的大部分单元厚度聚集在 1 或 0?

如果很多单元处于中间密度（表现为中间厚度），那么需要调整离散参数。DISCRETE（离散）参数（在 optimization 面板下的 opti control 面板中设置）使得处于中间密度的单元移向两端 1 或 0，这样产生更加离散化的结构。

密度趋于 1.0 的区域需要加固，密度趋于 0.0 的区域可以删除。

是否 max =栏处显示=1。0e+00?

如果显示 1.0，则保持不变；如果不是，还需要继续优化。允许更多步迭代或减小 OBJTOL 参数（可在 opti control 面板中设置）。

如果调整了 DISCRETE 参数，合并检查面板的控制，重新定义网格，和（或）减小了目标容差仍然无法得到一个更加离散的方案（没有单元密度达到 1.0），则可能需要检查一下优化问题的设置情况。对于给定的目标函数，一些定义的约束可能无法达到，反之亦然。

STEP 15 查看单元密度的等值线云图结果

图 2−57 提供了单元密度信息。Iso Value 表明保留在某个密度阈值及以上的单元。选取能够提供适合用户需要结构的密度阈值。

（1）从 Results 下拉菜单中，单击 Plot 中的 Iso。

（2）从页面下方，在 Result type 处选择 Element Densities。

（3）单击 Apply 按钮。

（4）将 Current Value 设为 0.15，如图 2−57 所示。

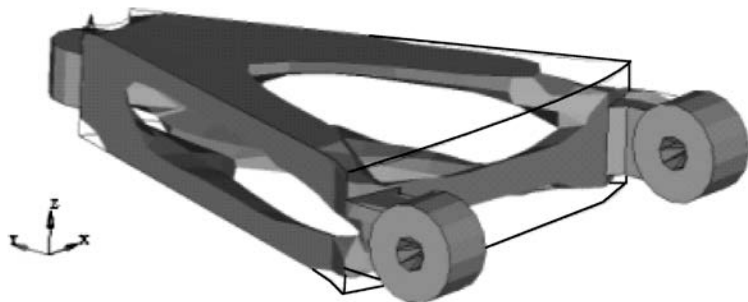


图 2−57　等值图结果

（5）移动 Current value 下的滑动条，改变密度阈值。

当用户移到一个新值，在图形窗口将看到对应更新等值线值的模型。利用该工具，可更好地查看材料分布和载荷传递路径。

在拓扑优化的同时，进行对称和拔模方向约束。

（6）下面将演示如何在实施对称和拔模方形约束的同时，对汽车控制臂进行拓扑优化分析。

除为更好地理解对称和拔模加工约束的影响需重新划分网格外，在设计概念方面所考虑的其他优化问题与已建模型相同。图 2−58 显示的有限元网格包括可设计区域和非可设计区域。

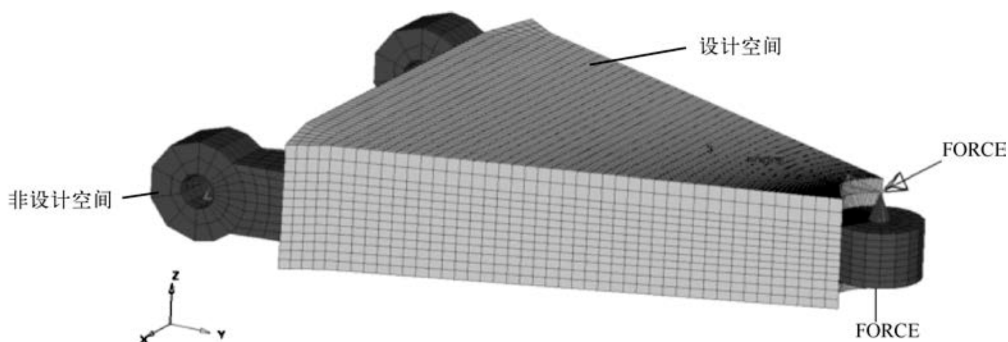


图 2−58　优化模型

STEP 16 载入模型

（1）启动 HyperMesh。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct，并单击 OK 按钮。

（3）单击 File 菜单，选择 Import 命令。

（4）将 Import type 设为 FE Model。

（5）在 File type 处选择 OptiStruct。

（6）单击 Select file 按钮，在<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/ optistruct/ 下选择文件 carm_draw_symm.fem。

（7）单击 Import。

STEP 17 定义对称约束和加工拔模方向约束

（1）从 Analysis 页，进入 optimization 页面。

（2）单击 topology，进入定义面板。

（3）单击 review，选择设计变量 solid。

选择 parameters 子面板，定义 minimum =为 16.0（最小成员尺寸），如图 2−59 所示。

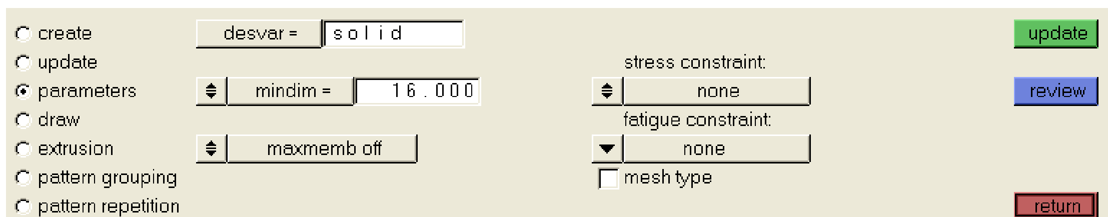


图 2−59　优化变量创建面板

这使得结构任意部分的尺寸或厚度要大于 16mm。如果用户没有设置该项，则 OptiStruct 基于网格平均尺寸自动选择最小成员尺寸（条件是选择一个加工约束）。

（4）单击 update，使最小单元尺寸设置有效。

（5）选择 draw 子面板，设置拔模方向。

（6）将 draw type 的选择器设为 single。

（7）按图 2−60 所示，选择 anchor node 和 first node。该两节点定义了 Z 轴正方向。

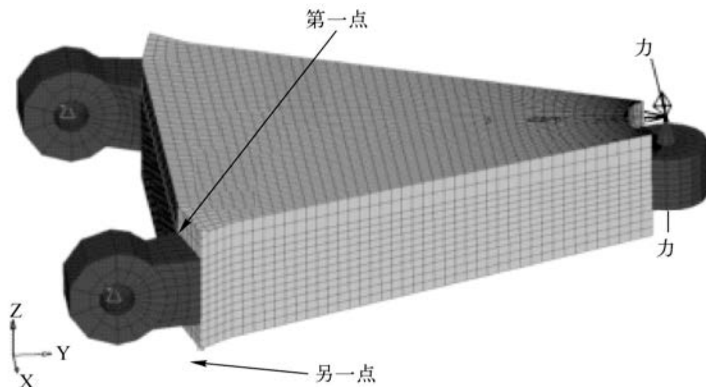


图 2−60　方向节点选择

（8）在 obstacle 处选择属性 nondesign。

（9）选择 pattern grouping 子面板，定义对称约束，将 pattern type 设为 1-pln sym。

不论初始网格、边界条件或载荷，拓扑优化中的对称约束为实体模型创建对称设计。在本实例中，选项 1-pln sym 使得设计关于一个已定义平面对称。网格不必对称，因为 OptiStruct 将创建关于对称面基本相同的设计。根据 anchor node 和 first node 确定对称面。从 anchor node 到 the first node 定义的向量，是对称面的法向向量，并且该对称面通过 anchor node。

（10）单击 anchor node，在 node id=处输入 1，按〈Enter〉键。

（11）单击 first node，在 node id=处输入 2，按〈Enter〉键。

（12）单击 update 按钮，更新设计变量。

这两个节点定义了沿 *Z* 轴方向的向量。因此，定义垂直于 *Z* 轴方向的对称面 （就像 *X*-*Y* 平面），该平面通过 anchor node。这样就完成了对称约束的定义。

（13）单击两次 return 按钮，返回 Analysis 页。

STEP 18 优化分析计算

该问题需要近 1h 才能计算完成。

（1）从 Analysis 页，进入 OptiStruct 面板。

（2）单击 input file 后的 save as，输入 carm_draw_symm_complete.fem，单击 Save 按钮。

（3）设置输出选项为 all。

（4）单击 run options 切换到 optimization。

（5）确认 memory options 切换到 2 000。

（6）在 options 处保持空白。

（7）单击 OptiStruct，开始优化求解。

（8）当出现信息“…Processing complete”，关闭 DOS 窗口或 shell，单击 return 按钮。

（9）在 HyperView 中查看后处理结果。

STEP 19 查看密度结果云图

一旦在命令窗中看到 Process completed successfully，就单击 HyperView 按钮。

（1）单击 Close 按钮，关闭消息窗口。

（2）单击 Previous Page 按钮，直到出现页名是 Design History，表明此时对应优化迭代的结果。

（3）单击工具条下的 Contour 按钮。

注意：Result type 是 Element Densities [s]，它是文件_des.h3d 中唯一的结果类型。

（4）第二个下拉菜单显示 Density。

（5）在 Averaging method 处，选择 Simple。

（6）单击 Apply 按钮，显示密度云图。

注意到云图全部是蓝色的，这是因为现在是第 0 个迭代步的结果。

（7）在 Results Browser 处，选择最后一个迭代步，结果如图 2−61 所示。

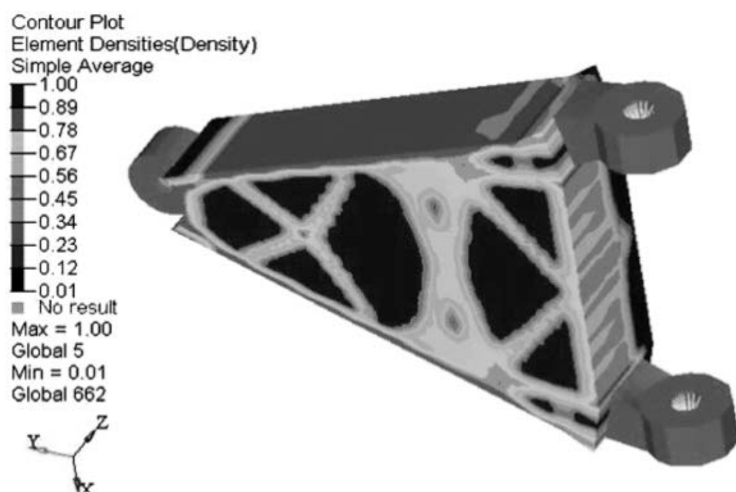


图 2-61　优化结果

图 2-61 中已将图例颜色分配给模型的每个单元，表明了对应迭代步下单元的密度。

STEP 20 查看单元密度的等值线云图结果

（1）从 Results 下拉菜单中，单击 Plot 下的 Iso，从页面下方，在 Result type 处选择 Element Densities。

（2）单击 Apply 按钮。

（3）将 Current Value 设为 0.2。

在图形窗口中，显示的是模型中密度不小于 0.2 的部分，如图 2-62 所示。

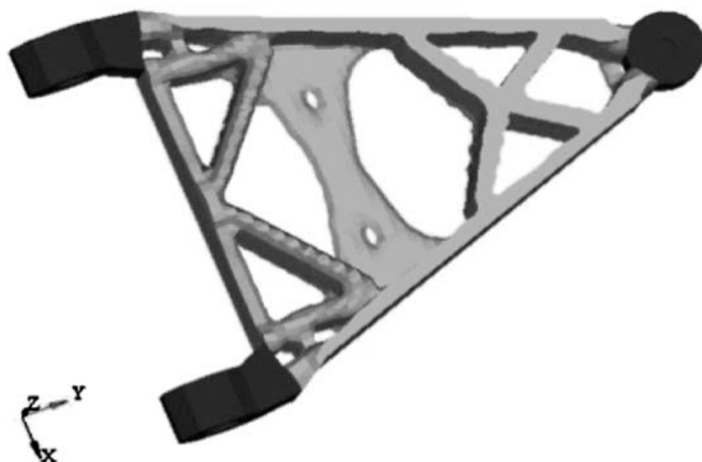


图 2-62　单元密度等值线图

（4）移动 Current value 下的滑动条，改变密度阈值。

当用户移到一个新值时，将在图形窗口中看到对应更新等值线值的模型。利用该工具，可更好地查看材料分布和载荷传递路径。

（5）从 File 下拉菜单中，选择 Exit 退出 HyperView。

2.5 实例：使用CWELD单元进行焊点拓扑优化

本实例介绍如何使用一维拓扑优化。模型是一个简单的焊点构件，焊点使用 CWELD 单元模拟。

在<Hyperworks11.0 的安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct 下找到文件 hut.hm，将该文件复制到工作文件夹。模型文件如图 2−63 所示。

优化的目标是在 3 种载荷工况下加权应变能最小，焊接单元优化后的体积分数不能超过 0.3，设计空间为焊接单元区域。

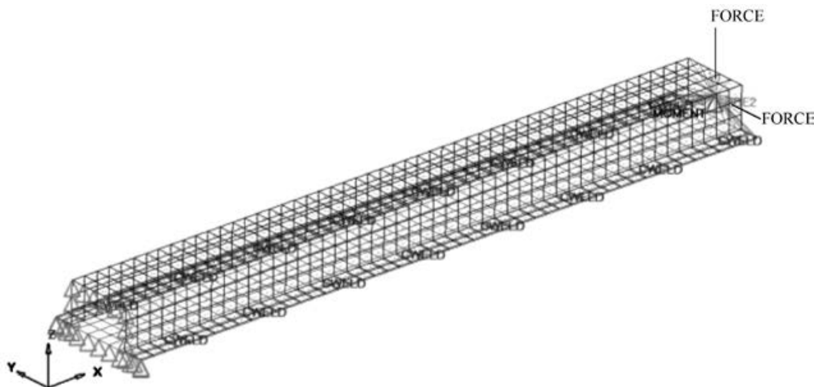


图 2−63　优化模型

优化问题描述如下：

✓ 定义设计空间。
✓ 设定优化问题。
✓ 查看后处理的结果。

STEP 01 在 HyperMesh 中加载模型

（1）启动 HyperMesh。
（2）在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct，并单击 OK 按钮。
（3）从工具栏中的 Preferences 下拉菜单中找到 User Profiles 命令。
（4）从工具栏中的 File 下拉菜单中，选择 Import 命令。
（5）在<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct/ 下选择文件 hut.hm。
（6）单击 Open 按钮。
（7）这样将载入 hut.hm 到 HyperMesh 中，并取代了现有的文件。

STEP 02 定义设计空间

（1）进入 Analysis 页。

（2）单击 optimization。这将打开优化模块。
（3）单击 topology。
（4）选择 create 按钮。
（5）在 desvar =处输入 tpl。
（6）设置 type 为 PWELD。
（7）单击 props。
（8）选择 PWELD_500 旁的复选框。
（9）单击 return 按钮。
（10）单击 create 按钮。
（11）完成设计空间的定义。
（12）单击 return 按钮。

STEP 03 定义响应

（1）单击 responses。
（2）单击 response type 下的切换器，从弹出的菜单中选择 volumefrac。
（3）单击 total 旁的切换按钮，切换到 by entity。
（4）此时出现一个黄色的选择器。
（5）切换到 props。
（6）单击 props。
（7）选择 PWELD_500 旁的复选框。
（8）单击 select。
（9）在 response = 处输入 volfrac。
（10）单击 create 按钮。
（11）定义一个体积分数响应。
（12）在 response=处输入 wcomp。
（13）单击 response type 下的切换器，弹出列举了可用于 OptiStruct 优化的所有响应的菜单。
（14）单击箭头按钮，进入第二页。
（15）单击 weighted comp，将它选做响应类型，返回 response 面板。
（16）单击 loadsteps。
（17）勾选对应所有工况的 3 个复选框。
（18）将对应于 SUBCASE2 和 SUBCASE3 的加权系数改为 100.0。
（19）相对于加权系数为 1 的扭转工况 SUBCASE1，另外两个弯曲工况作用更显著。
（20）单击 return 按钮。
（21）单击 create 按钮。
（22）定义一个加权应变能响应。
（23）单击 return 按钮。

STEP 04 定义约束和目标

（1）单击 dconstraints。
（2）选择 response，选择已定义的 volfrac。
（3）勾选 upper bound =，输入 0.3。
（4）在 constraint = 处输入 volfrac。
（5）单击 create 按钮。
（6）定义一个体积分数约束。
（7）单击 return 按钮。
（8）单击 objective。
（9）选择 response，选择已定义的 wcomp。
（10）选择 min。
（11）单击 create 按钮。
（12）定义加权应变能目标。
（13）单击 return 按钮。
以上囊括了定义优化的问题。为了获得更好的结果，需要调整一些优化参数。
（14）单击 opti control。
（15）勾选 DISCRETE1D =，输入 20.0。
（16）通过增大密度方法中的惩罚因子，只能帮助一维单元获得一个离散的结果。
（17）勾选 OBJTOL=，输入 1.e−5。
这样减少了用于检查收敛的目标容差。
（18）单击两次 return。

STEP 05 优化分析计算

（1）单击 OptiStruct，进入运行 OptiStruct 的面板。
（2）单击 input file 后的 save as 按钮。
（3）选择想把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 hut_opt.fem。
（4）使用文件拓展名.fem 作为 OptiStruct 输入卡。
（5）单击 Save 按钮。
（6）注意在 input file 栏中出现 hut_opt.fem 文件的名字和位置。
（7）单击 export options 切换到 all。
（8）单击 run options 切换到 optimization。
（9）单击 memory options 切换到 memory default。
（10）单击 OptiStruct。
这将开始在 DOS 或 UNIX 窗口中执行 OptiStruct。

STEP 06 查看优化后的节点位置

对结果进行后处理，将焊接单元按照密度不同放到不同的 components。

（1）单击 File 菜单，选择 Run 下的 Command File 命令。

（2）打开 command file execution 面板。

（3）用 browse 找到运行 OptiStruct 后输出的 hut_opt.HM.comp.cmf 文件。

（4）单击 Open 按钮。

（5）单击 execute。

结果中，4 个焊接单元放到了密度为 0.9～1.0 的 component 中，所有其他的都放到了密度为 0.0～0.1 的 component 中。

（6）关闭低密度（0.0～0.1 至 0.8～0.9）components 的显示，回到 Radioss 面板，将 export options 设为 displayed，重新分析焊机后的单元，如图 2−64 所示。

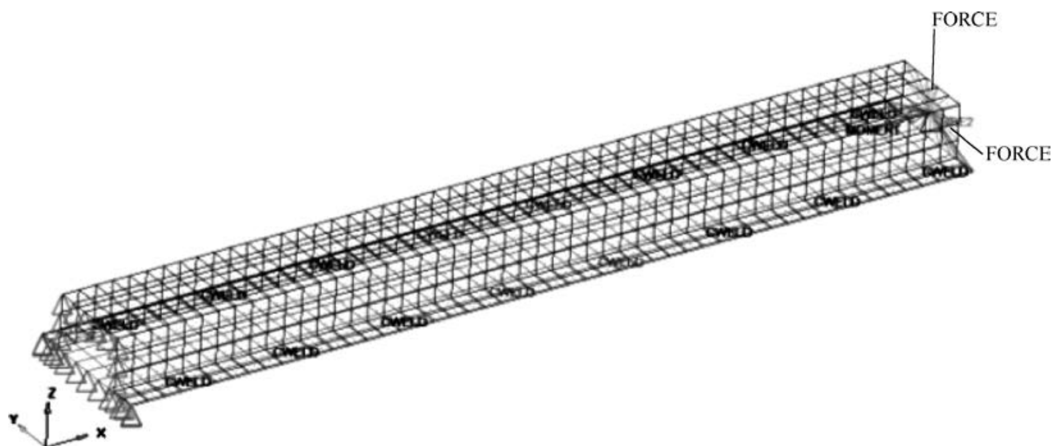


图 2−64　显示结果

2.6　实例：利用DMIG进行模型缩减的拓扑优化

在本实例中，通过简易悬臂梁的有限元模型演示如何利用静态缩减法简化有限元模型，并对缩减的模型进行拓扑优化。图 2−65 显示了未经静态缩减的完整悬臂梁模型。图 2−66 为悬臂梁模型的拓扑优化结果。

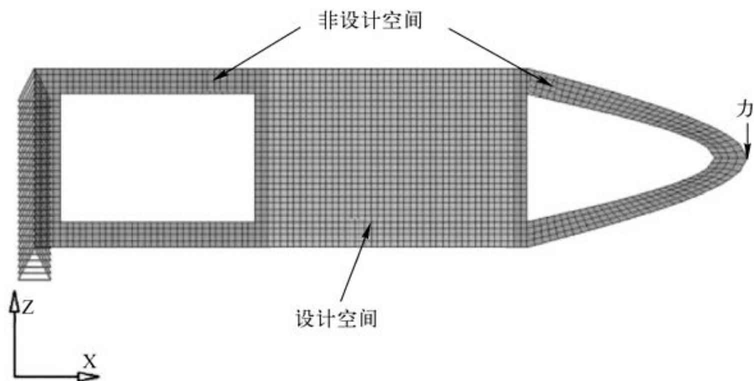


图 2−65　优化模型

优化问题描述如下。

✓ 目标：应变能最小化。

✓ 约束：Von Mises 应力小于 7，设计体积上限为 40%。

✓ 设计变量：设计空间的单元密度。

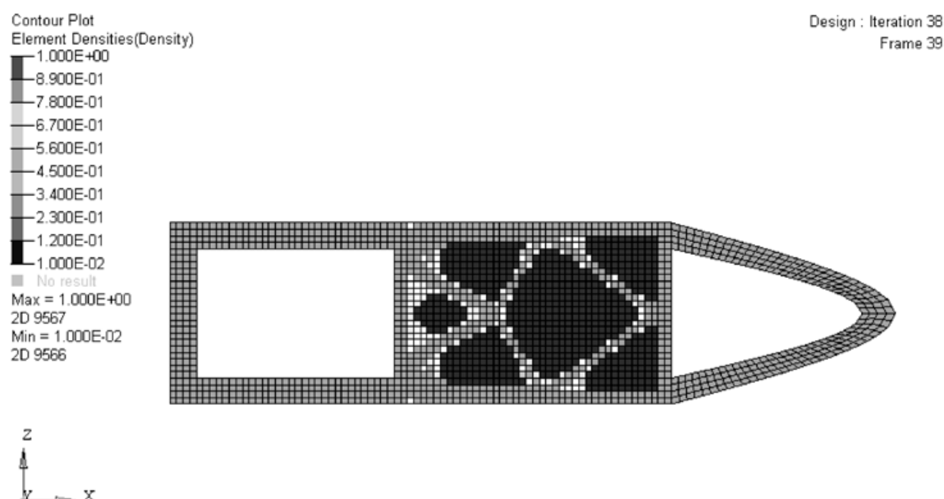


图 2−66　悬臂梁模型的拓扑优化结果

模型通过静态缩减法减掉的部分被称为超级单元。在 RADIOSS 中，利用 Bulkdata 中的对象 ASET 或 ASET1 定义超级单元边界的自由度，即与模型相连接部分（由直接矩阵输入文件代替）的自由度，如图 2−67 所示。随着 ASET 输入数目的增加，静态缩减法的精度和成本也相应增加。例如，使用静态缩减法后，用于计算的矩阵规模将减小，但是如果缩减的矩阵（DMIG）很密，则计算时间反而比整个模型采用稀疏矩阵的计算时间更长。因此，ASET 卡片的定义在应用 DMIG 进行有效分析时非常重要的。

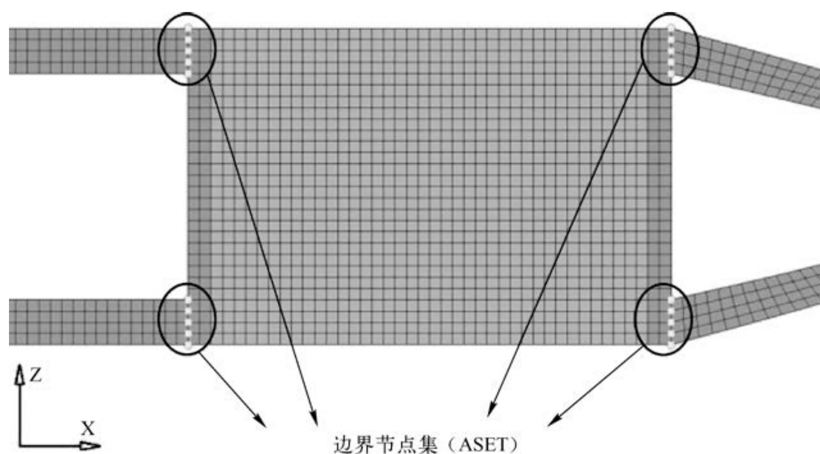


图 2−67　悬臂梁模型的边界自由度

为了防止缩减矩阵太密，需慎重创建 ASET 卡片，而不是对设计区与非设计区边界

处所有节点定义 ASET。由于本实例模型规模小，ASET 卡片的定义可能对计算时间影响不大。

本实例包括以下内容：

- ✓ 创建超单元。
- ✓ 将超单元融合到模型中。
- ✓ 为具有超单元的模型设置优化。
- ✓ 在 HyperView 中查看后处理结果。

STEP 01 打开 Hypermsh，加载用户配置

（1）启动 HyperMesh。

（2）默认情况下，出现 User Profiles 对话框。

（3）在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（4）单击 OK 按钮。

这样就加载了 RADIOSS/Bulk 和 Optistruct 所对应的 Hypermesh 设置。

STEP 02 打开文件 cantilever_full.hm

（1）从 File 下拉菜单中，选择 Open 命令。

（2）在<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct/选择文件 cantilever_full.hm，单击“打开”按钮。这样将载入 cantilever_full.hm 到 Hypermsh 中，并取代了现有的文件。模型显示如图 2−68 所示。

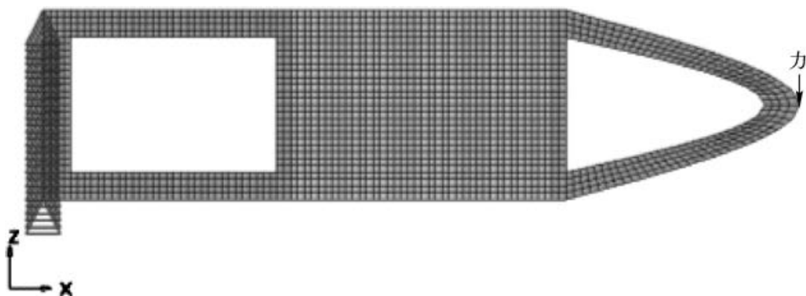


图 2−68　有限元模型

STEP 03 创建卡片 ASETs （指定超单元装配体的边界自由度）

（1）单击 Load Collectors 按钮 。

（2）单击 loadcol name =，输入 Asets。

（3）在 card image =处不用做任何选择，单击 create 按钮。

（4）单击 return 按钮。

（5）从 Analysis 页，进入 constraints。

（6）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（7）在图形窗口中选择图 2-67 显示的边界节点。

（8）确保勾选 1～6 全部的自由度。

（9）勾选的自由度将分配到 ASET 中。

Dofs 1，2，3 是沿 *x*，*y*，*z* 轴方向的线位移自由度。

Dofs 4，5，6 是绕 *x*，*y*，*z* 轴旋转的角自由度。

（10）单击 Load Type=，选择 ASET。

（11）单击 create 按钮。

（12）单击 return 按钮，返回主菜单。

STEP 04 删除在后续优化计算中的模型单元

对于缩减部分单元（超单元）将生成缩减矩阵和载荷矢量。所以，需要创建一个新模型，完全由超单元组成，载荷和边界条件直接作用在该部分。

（1）从 Tool 页，选择 delete 面板。或直接利用快捷键〈F2〉，进入 delete 面板。

（2）单击对象选择切换键，从弹出的菜单中选择 elems。

（3）单击 elems，从弹出的菜单中选择 by window。

（4）将鼠标指针移到图形区域，按住 Shift+鼠标左键，框选如图 2-69 所示的窗口中的单元。

（5）单击 delete entity。

（6）单击 return 按钮，返回主菜单。

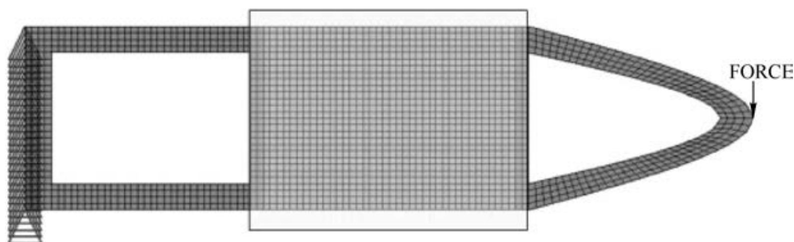


图 2-69　需删除的单元

STEP 05 定义参数将缩减矩阵存储到外部文件

为激活矩阵存储进程，需定义 bulkdata 对象 PARAM 和 EXTOUT 。没有定义该参数的话，计算将与普通情况无异。该参数有两个选项：DMIGPCH，将矩阵以 ASCII 的格式存储到文件.pch 中。DMIGBIN，将矩阵以二进制的格式存储到文件.dmg 中。本实例中利用 DMIGPCH。

（1）从 Analysis 页，选择 control cards 面板。

（2）单击两次 Next 按钮，选择 PARAM，勾选 EXTOUT 旁的复选框。

（3）选择 DMIGPCH。

（4）单击 return 按钮，退出 PARAM。

（5）单击 return 按钮，返回主菜单。

STEP 06 保存 DMIG（缩减矩阵）的数据

（1）选择 Files 菜单。

（2）单击 save as 按钮，设置保存文件的目录，在 File name 处输入 cantilever_dmig.hm。

（3）单击 Save 按钮。

STEP 07 运行计算

（1）从 Analysis 页，选择 OptiStruct 面板。

（2）单击 input file 后的 save as 按钮。

（3）选择想把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 cantilever_dmig.fem。

（4）单击 Save 按钮。

（5）单击 export options 切换到 all。

（6）单击 run options 切换到 analysis。

（7）单击 memory options 切换到 memory default。

（8）单击 OptiStruct。

（9）启动 OptiStruct，开始求解。

如果分析成功，则在命令窗中没有任何错误信息。当命令窗出现 Processing completed successfully，则表示该分析完成。将在保存 OptiStruct 模型的文件夹中看到新结果。可以在文件 cantilever_dmig.out 中查看错误，有助于排除已发生的错误。

矩阵以与 bulkdata 对象 DMIG 相同的格式存储到.pch 文件。默认情况下，刚度矩阵的名字是 KAAX，质量矩阵的名字是 MAAX，载荷矩阵的名字是 PAX。因为在例中不利用质量矩阵，所以它不写入.pch 文件中。

I/O 选项对象 DMIGNAME 用于控制矩阵的名称。

STEP 08 清空 HyperMesh 的数据库

从 File 菜单中单击 New 命令，这将清空 HyperMesh 现有的数据库。

STEP 09 重新打开文件 cantilever_full.hm

（1）选择 File 菜单，将鼠标指针移到 Recent Files。

（2）将鼠标指针向右侧移，出现列表，选择 cantilever_full.hm。

这样将 cantilever_full.hm 载入到 Hypermesh 中，并取代了现有的文件。

STEP 10 删除利用 DMIG 定义的超单元

因为超单元矩阵将由 DMIG 替代，所以需删除对应超单元部分的节点、单元、载荷和边界条件等 bulkdata 对象。

（1）从 Tool 页，选择 delete 面板。

（2）单击对象选择器，从弹出菜单中选择 elems。

（3）单击 elems，从弹出菜单中选择 by window。

（4）将鼠标移到图形区域，框选下图所示窗口中的单元，如图 2−70 所示。

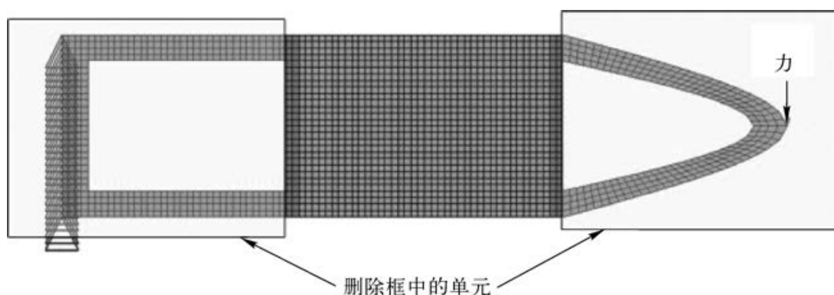


图 2−70 需删除的单元

（5）单击 delete entity。

（6）虽然与这些单元相关的 load collector 仍然存在，但已经不起作用，即模型没有了约束和载荷。

（7）单击 return 按钮，返回主菜单。

STEP 11 DMIG 为拓扑优化定义所需的卡片

（1）从 Analysis 页，选择 control cards 面板。

（2）单击 INCLUDE_BULK。

（3）输入 cantilever_dmig_AX.pch。

缩减矩阵（DMIG）将被 RADIOSS 求解文件包含进去。在这里我们假定文件 cantilever_dmig_AX.pch 与拓扑优化均在同一文件夹下。如果是在不同的文件夹下，那么需输入该.pch 文件的完整路径。

（4）单击 return 按钮，退出 INCLUDE_BULK。

（5）选择 K2GG，输入 KAAX。

（6）指定缩减刚度矩阵的名字为 KAAX（存储在文件 cantilever_ dmig_AX.pch）。

（7）单击 return 按钮，退出 K2GG 子面板。

（8）选择 P2G 子面板。

（9）在 P2G=处输入 PAX。

（10）单击 return 按钮，退出 P2G 子面板。
（11）单击 return 按钮，返回主菜单。
（12）为具有超单元的模型设置优化。

STEP 12 在拓扑优化中创建设计变量

（1）从 Analysis 页，选择 optimization 面板。
（2）进入 topology 面板。
（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。
（4）单击 desvar =，输入 topo。
（5）单击 props。
（6）勾选 design 旁的复选框。
（7）单击 select。
（8）将 type 切换为 PSHELL。
（9）单击 create 按钮。
（10）单击 parameters。
（11）将 minmemb off 切换到 mindim =，并输入 1.2
（12）在 stress constraint 下，从 none 切换到 stress=。
（13）在 stress=处，输入 7。
定义应力约束上限。
（14）单击 update。
（15）单击 return 按钮，返回 optimization。

STEP 13 创建体积和应变能（柔度）响应

（1）选择 responses。
（2）在 response =处输入 Volfrac。
（3）单击 response type 下的转换按钮，选择从弹出的菜单中选择 volumefrac。
（4）单击 create。
（5）在 response =处输入 Compl。
（6）单击 response type 下的转换按钮，选择从弹出的菜单中选择 compliance。
（7）单击 create 按钮。
（8）单击 return 按钮，返回 optimization。

STEP 14 创建体积分数约束

（1）单击 dconstraints，定义约束。

（2）在 constraint =处输入 Constr。

（3）单击 response type 下的转换按钮，选择从弹出的菜单中选择 Volfrac。

（4）勾选 upper bound =前的复选框。

（5）单击后面的文本框中输入 0.4。

（6）单击 create 按钮。

（7）创建体积分数约束。

（8）单击 return 按钮，返回 optimization 面板。

STEP 15 定义应变能（柔度）最小化

（1）单击 objective，定义目标函数。

（2）单击面板左上角的转换器，从弹出的菜单中选择 min。

（3）单击 response=，从已有响应列表中选择 Compl。

（4）单击 loadstep。

（5）选择工况 step。

（6）单击 create 按钮。

（7）单击两次 return 按钮。

此时完成了优化问题的设置。如果只定义应力值约束而不定义体积分数约束，则由于优化目标是刚度最大化，模型的优化设计结果将是保持厚度不变。所以用户需要设置体积分数约束。

STEP 16 保存数据

（1）在 Files 菜单中单击 save as 命令。

（2）选择文件保存的文件夹，并在 File name 处输入 cantilever_opti.hm。

（3）单击 Save 按钮。

STEP 17 优化分析计算

（1）在 Analysis 页，进入 OptiStruct 面板。

（2）单击 input file 后的 save as 命令。

（3）选择想把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 cantilever_opti.fem。

（4）单击 Save 按钮。

（5）注意在 input file 中出现文件 cantilever_opti.fem 的名字和位置。

（6）单击 export options 切换到 all。

（7）单击 run options 切换到 optimization。

（8）单击 memory options 切换到 memory default。

（9）单击 OptiStruct。

OptiStruct 求解器开始计算工作。如果计算成功，则 OptiStruct 模型所在文件夹将写入新的结果文件。用户可以在文件 cantilever_opti.out 中检查错误信息，如果有任何错误，则该文件可帮助用户检查输入卡。

STEP 18 单元密度云图

OptiStruct 输出所有迭代步中经拓扑优化的壳单元的单元密度和厚度结果。另外，默认输出第一迭代步和最后一个迭代步的特征向量结果。下面的内容描述如何在 HyperView 中查看这些结果。

（1）从 OptiStruct 面板，单击 HyperView 按钮。

（2）单击工具条下的 Contour 按钮。

（3）在 Result type 处选择 Element densities（s），查看密度。

（4）在 Averaging method 处选择 Simple。

（5）单击 Apply 按钮。

（6）单击，从 Simulation 列表中选择最后一个迭代步，如图 2-71 所示。

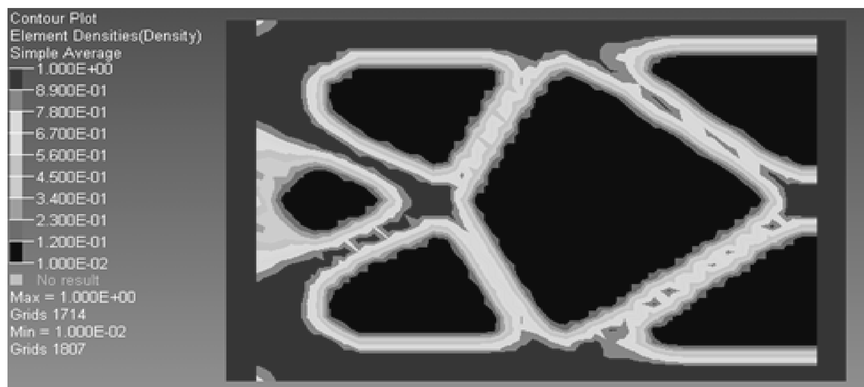


图 2-71 由施加的载荷和边界条件得到的单元密度结果云图

STEP 19 密度等值面图

对于分析从 OptiStruct 中得到的密度结果，等值面图是很有用的工具。该特性对于分析模型设计区域的密度结果是很有用的工具。

（1）单击工具条下的 Iso 按钮。

（2）在 Result type 处选择 Element Densities。

（3）确定将 Show 设为 Above。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）同时勾选 Features 和 Transparent 旁的复选框。

（6）改变现有值看到更多材料的模型。在 Current value 处输入 0.3。云图显示如图 2–72 所示。

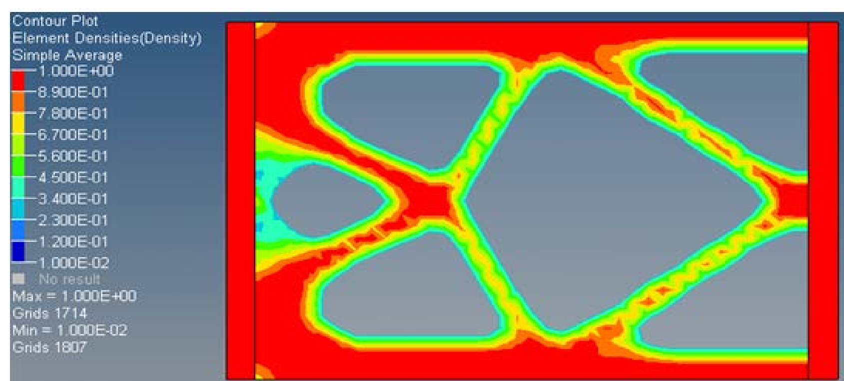


图 2–72　优化结果

（7）拖动滑动条改变 Element densities 的现有值。

HyperView 中的等值面特征非常适合查看 OptiStruct 密度结果。

（8）单击，并拖动滑动条（现在指向 0.3 对应的位置）改变密度的等值面。

在用户改变等值面值的同时，图形窗口中的等值面云图相应发生变化。利用该工具可以更好地查看材料分布和载荷路径。

2.7　实例：矩形板的频率响应优化

本实例描述如何使用 OptiStruct 进行频率响应优化。首先导入已有的平板有限元模型，进行模态频率响应分析，获取峰值。然后对同一个模型执行动态响应优化，获取一个新的设计。新设计得到了最小峰值响应的最佳材料分布。利用 Hyperview 中的后处理工具显示复杂位移结果的等值面图、幅值及相位图。模型文件如图 2–73 所示。

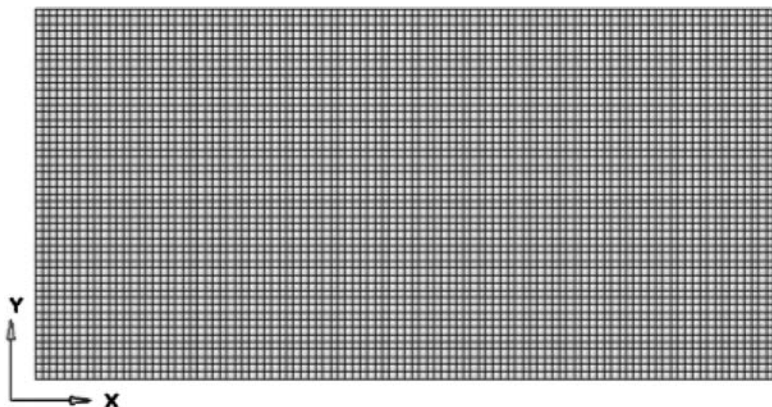


图 2–73　平板模型

- ✓ 目标：体积最小化。
- ✓ 约束：最大频率响应位移小于 600mm。
- ✓ 设计变量：设计空间中单元的密度。

本实例包括以下内容：

- ✓ 在 HyperMesh 中设置模态频率响应分析。
- ✓ 对 FRF（频率响应）结果进行后处理。
- ✓ 设置拓扑优化。
- ✓ 对拓扑结果进行后处理。

STEP 01 打开 Hypermsh，加载用户配置，并载入文件

（1）打开 HyperMesh。

（2）用户界面出现 User Profiles 窗口。

（3）选择 OptiStruct。

（4）单击 OK 按钮。

这样就加载了 RADIOSS/Bulk 和 Optistruct 所对应的 Hypermesh 设置。在用户界面中，通过工具条中的 Preferences 菜单可以找到 User Profiles 命令。

（5）从工具栏中的 File 菜单中，选择 Import 命令。

（6）在标签菜单中会增加标签 Import。

（7）设置 Import type 为 Import FE Mode。

（8）设置 File type 为 OptiStruct。

（9）选择 File，打开位于<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下的文件 frf_response_input.fem。

（10）单击 Import 按钮。

（11）载入 OptiStruct 输入文件 frf_response_input.fem 到 HyperMesh。

（12）单击 Close 按钮。

（13）在 HyperMesh 中设置模态频率响应分析。

STEP 02 创建载荷集 SPC 和 Unit

在该部分，约束模型的单边。在平板的自由边端部节点上施加一个沿着 *z* 轴正方向的垂向单位载荷。下面首先创建两个名为 spcs 和 unit-load 的载荷集。

（1）在 Model Browser（模型浏览窗口）内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，单击 LoadCollector。

（2）在 Name 栏处输入 spcs。

（3）单击 color，从调色板中选择一种颜色。

（4）在 Card Image 选项框中保留 Select type 为 none。

（5）单击 create 按钮。

（6）创建载荷集 spcs。

（7）在 Model Browser（模型浏览窗口）内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，单击 LoadCollector。

（8）在 Name 栏处输入 unit-load。

（9）单击 color，从调色板中选择另一种颜色。

（10）单击 create 按钮。

STEP 03 创建约束

（1）从 Model Browser 中，展开 LoadCollectors，用鼠标右键单击 spcs，选择 Make Current。

（2）进入 Tool 页，选择 numbers 面板。

（3）单击 nodes，从对象拓展选择菜单中选择 by id。

（4）一个接一个地输入下面的数字：1，2，3，4。

（5）单击 on。

（6）单击 return 按钮。

（7）从 Analysis 页，进入 constraints 面板。

（8）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（9）单击对象选择切换器，在弹出的菜单中选择 nodes。

（10）利用 by id，选择节点号：1 和 2。

约束 All Dofs（全部自由度）。

勾选自由度旁的复选框，则约束该自由度；不勾选，则释放该自由度。

dofs 1，dofs 2，dofs 3 是沿 *x*，*y*，*z* 轴方向的线位移自由度。

dofs 4，dofs 5，dofs 6 是绕 *x*，*y*，*z* 轴旋转的角自由度。

（11）单击 create 按钮。

（12）约束了所选节点的全部自由度。

（13）再次选择 nodes，利用 by id，选择节点号为 4。

（14）除了 dof3 外，不勾选其他的自由度，单击 create 按钮。

（15）单击 return 按钮，回到主菜单。

STEP 04 在平板上一点创建一个单位载荷

（1）从 Model Browser 中，展开 LoadCollectors，用鼠标右键单击 unit-load，选择 Make Current。

（2）从 Analysis 页，进入 constraints 面板。

（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（4）单击对象选择切换器，在弹出的菜单中选择 nodes。

（5）如图 2-74 所示，选择平板上的节点 3。

（6）除了 dof3 外，不勾选其他的自由度，并在 dof3 右侧输入 20。

（7）单击 load types，选择 DAREA。

（8）单击 create 按钮。

（9）单击 return 按钮。

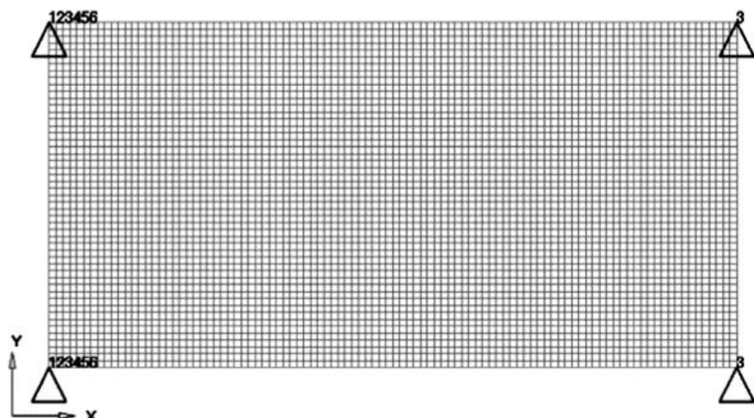


图 2–74　平板的有限元模型

STEP 05 创建频率范围表

（1）在 Model Browser（模型浏览窗口）内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，单击 LoadCollector。

（2）在 name =处输入 tabled1。

（3）单击 color，从调色板中选择一种颜色。

（4）单击 Card Image 选项框处的下拉菜单，从中选择 TABLED1。

（5）选择 Card edit loadcollector upon creation 旁的复选框，单击 create 按钮。

工作区出现一个新的窗口，如图 2–75 所示。

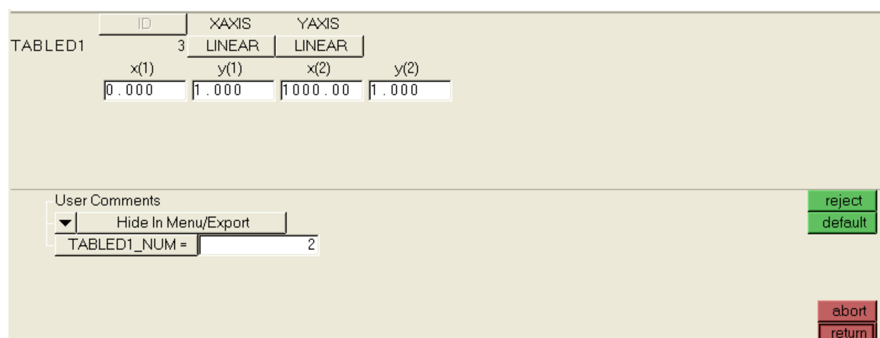


图 2–75　表格卡片面板

（6）单击 TABLED1_NUM =，输入 2。

（7）单击 y（1）下的输入栏，输入 1.0。

（8）单击 x（2）　下的输入栏，输入 1000.0。

（9）单击 y（2）　下的输入栏，输入 1.0。

（10）注意 x（1）处保持为 0.0。

（11）单击 return 按钮。载荷曲线如图 2–76 所示。

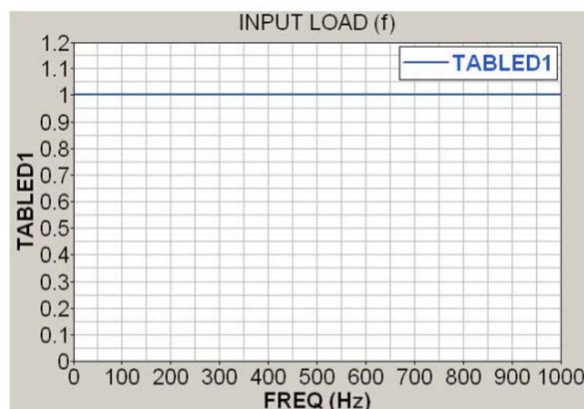


图 2–76　查看曲线

频率为 0.0～1000.0Hz，载荷恒定。

STEP 06 创建一个随频率变化的动载荷

（1）在 Model Browser（模型浏览窗口）内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，单击 LoadCollector。

（2）在 name =处输入 rload2。

（3）单击 color，从调色板中选择一种颜色。

（4）单击 Card Image 选项框处的下拉菜单，从中选择 RLOAD2。

（5）选择 Card edit loadcollector upon creation 旁的复选框，单击 create 按钮。

工作区出现一个新的窗口，如图 2–77 所示。

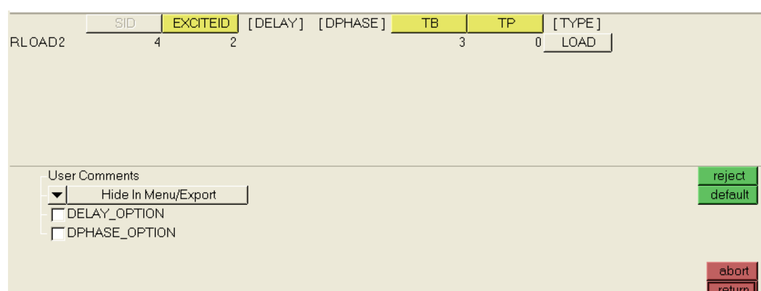


图 2–77　载荷编辑

（6）双击 EXCITEID 处的按钮（呈黄色）。

在左下角出现集合器列表。

（7）从列表中选择 unit-load，EXCITEID（呈黄色）框下出现 2。

（8）双击 TB 处的按钮（呈黄色）。

（9）在左下角出现集合器列表。

（10）选择 tabled1。

（11）单击 Type，设为 LOAD。

（12）这将集中力定义为输入。

（13）单击 return 按钮，退出面板。

STEP 07 创建一系列用于响应求解的频率

（1）在 Model Browser（模型浏览窗口）内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，单击 LoadCollector。

（2）在 name =处输入 freq5。

（3）单击 color，从调色板中选择一种颜色。

（4）单击 Card Image 选项框处的下拉菜单，从中选择 FREQi。

（5）勾选 Card edit loadcollector upon creation 旁的复选框，单击 create 按钮，如图 2-78 所示。

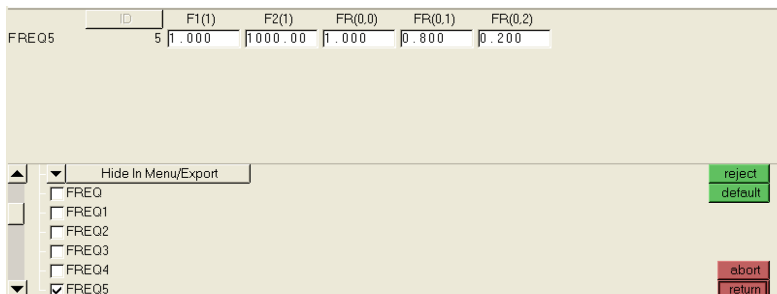


图 2-78　编辑频率卡片

（6）勾选 FREQ5。

（7）在 NUMBER_OF_FREQ5=处输入 1。

（8）在 FREQ5_MAX_NUMBER_OF_FR=处输入 3。

（9）单击 F1 下的输入栏，输入 1.0

（10）单击 F2 下的输入栏，输入 1000。

（11）单击 FR（0，0）下的输入栏，输入 1。

（12）单击 FR（0，1）下的输入栏，输入 0.8。

（13）单击 FR（0，2）下的输入栏，输入 0.2。

（14）单击 return 按钮。

通过指定频率范围和此范围内固有频率的间隔，为模态频率响应分析定义一系列频率，如图 2-79 所示。

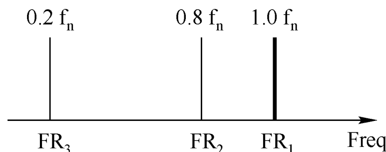


图 2-79　频率指定

STEP 08 创建用于模态法的载荷集合器 EIGRL

（1）在 Model Browser（模型浏览窗口）内上单击鼠标右键，移动光标至 Create，单击 LoadCollector。

（2）在 name =处输入 eigrl。

（3）单击 color，从调色板中选择一种颜色。

（4）单击 Card Image 选项框处的下拉菜单，从中选择 EIGRL。

（5）勾选 Card edit loadcollector upon creation 旁的复选框，单击 create 按钮。

（6）单击 ND，在它下面的输入框中输入 17。

（7）单击 return 按钮。

（8）指定利用 Lanczos 法提取前 17 阶模态的特征值（固有频率）。

STEP 09 创建 OptiStruct 的载荷步（也称为子工况）

（1）从 Analysis 页，进入 loadsteps 面板。

（2）在 name =处输入 subcase1。

（3）单击 type 后的切换器，从弹出的菜单中选择 freq.resp（modal）。

（4）勾选 SPC 前面的复选框。

（5）单击对象栏处，在载荷集合器列表中选择 spcs。

（6）勾选 METHOD （STRUCT）前面的复选框。

（7）单击对象栏处，在载荷集合器列表中选择 eigrl。

（8）勾选 DLOAD 前面的复选框。

（9）单击对象栏处，在载荷集合器列表中选择 rload2。

（10）勾选 FREQ 前面的复选框。

（11）单击对象栏处，在载荷集合器列表中选择 freq5，如图 2-80 所示。

（12）单击 create 按钮。

结合载荷集合器 spc 中的约束和载荷集合器 rload2 中的单位载荷，以及 freq5 中定义的一系列频率和 eigrl 中定义的模态方法创建了一个 OptiStruct 的子工况。

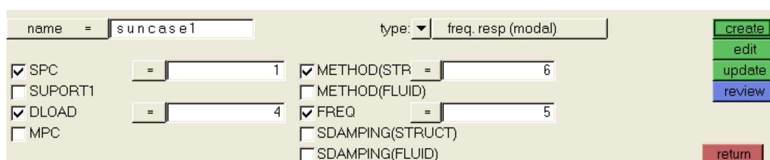


图 2-80　工况编辑面板

（13）在 FRF（频率响应分析）前，推荐先做下模态分析。这里忽略了该步骤，主要集中进行 Frequency Response Analysis 设置。

（14）单击 edit，勾选 RESVEC。

（15）将 TYPE 设为 APPLOAD， OPTION 设为 YES。

（16）单击两次 return 按钮，返回主菜单。

STEP 10 为输出结果创建一组节点

（1）从 Analysis 页，单击进入 entity sets 面板。

（2）单击 name =，输入 SETA。

（3）将 set type 设置成 non-ordered。

（4）单击 entity 处的切换器，从弹出的菜单中选择 nodes。

（5）确认黄色的类型复选框处为 nodes，并选择节点 3。

（6）在该节点施加载荷。

（7）单击 create 按钮。

（8）消息提示已创建对象组。

在 FRF（频率响应）仿真后，将获得数据量很大的结果文件。用户指定感兴趣的输出点是一个好方法，这将减少 CPU 的计算时间和需存储的数据量。

（9）单击 return 按钮。

STEP 11 定义频率响应分析的输出要求和阻尼

（1）从 Analysis 页，单击 control cards 面板，选择 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST。

（2）勾选 DISPLACEMENTS。

（3）在 DISPLACEMENTS_NUM=栏处输入 3。

（4）在屏幕中的工作区出现一个新窗口。

（5）单击 FORMAT（1），如图 2-81 所示选择 H3D。

（6）单击 FORM（1），如图 2-81 所示从弹出的菜单中选择 PHASE。

（7）单击 OPTION（1），如图 2-81 所示从弹出的菜单中选择 SID。

（8）出现一个黄色的新文本框。

（9）双击黄色的 SID 框，在左下角弹出的选择区中选择 SETA。

（10）在 SID 框下出现数字 1，表示只输出组 1 中的节点部分的位移。

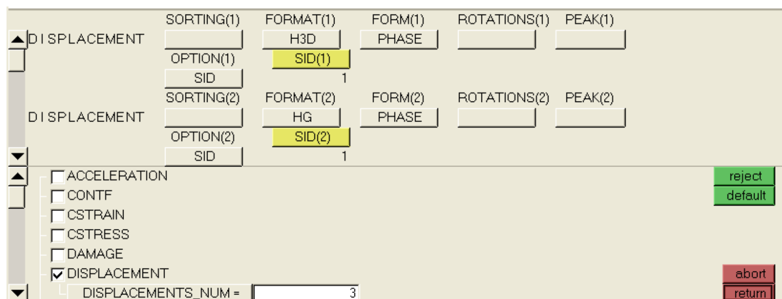


图 2-81 面板信息

（11）同样的，在第二个输出文件格式中选择 HG，第三个输出文件格式设为 OPTI，其他选项的设置如图 2-86 所示。

（12）单击 return 按钮，退出。

（13）单击 next 按钮，移到另一页。

（14）选择 PARAM 子面板，勾选 G。在屏幕的工作区中出现一个新窗口。

（15）单击 G_V1，输入 0.05，指定该系统的常阻尼系数是 Critical Damping Ratio 的 5%。

（16）单击 return 按钮，退出 PARAM。

（17）选择 OUTPUT 子面板。

（18）在工作区出现一个新窗口。

（19）将 KEYWORD 设为 HGFREQ。

（20）单击 FREQ，从弹出的选项中选择 LAST。

（21）保持 number_of_outputs 为 1。

（22）单击 return 按钮，退出 OUTPUT 子面板。

（23）单击 return 按钮，退出 control cards。

STEP 12 开始分析

（1）从 Analysis 页，单击 Radioss 面板。

（2）单击 input file 后的 save as，选择想把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 frf_response_analysis.fem。

（3）单击 Save 按钮。

（4）注意在 input file 栏中出现 carm_check.fem 文件的名字和位置。

（5）单击 export options 切换到 all。

（6）单击 run options 切换到 analysis。

（7）单击 memory options 切换到 memory default。

（8）保持 options 栏为空。

（9）单击 Radioss 按钮。

Radioss 求解器开始计算工作。如果计算成功，则 OptiStruct 模型所在文件夹将写入新的结果文件。用户可以在文件 frf_response_analysis.out 中检查错误信息，如有任何错误，该文件可帮助检查输入卡。

STEP 13 在 HyperGraph 中查看初始模型的峰值位移

该步骤讲解如何在 HyperGraph 中查看位移结果（.mvw 文件），还有从计算中弄清楚位移输出（.disp 文件）。结果文件只包含了输出节点组中 3 号节点的位移结果。

（1）启动 HyperView。

（2）单击 Close 按钮，关闭用于提示加载结果文件到 HyperView 的消息框。

（3）在 HyperView 菜单栏中的 File 处，选择 Open 中的 Session。

（4）弹出 Open Session File 窗口。

（5）找到结果文件存放的文件夹，打开文件 frf_response_analysis_freq.mvw。如果从 Radioss 中启动 Hyperview，则需要单击 Yes 按钮删除现有的内容。

（6）显示两个图表。

（7）注意到图表标题显示 Subcase 1（subcase1）-Displacements of grid 3。

（8）图表顶部显示 Phase Angle verses Frequency，底部显示 Displacement Response verses

Frequency。

（9）单击 Define Curves 按钮，删除曲线 X Trans 和 Y Trans。

激励施加在 Z 方向，检测到该方向的影响是主要的。

（10）单击 Curve Attributes 按钮，改变线属性 continue 。

（11）在相同的面板，单击 Symbol Attributes，选择方框形，如图 2-82 所示。

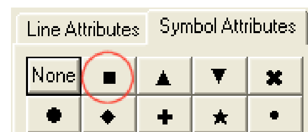


图 2-82　标记选择

（12）单击 Axes 按钮，改为 Vertical。

（13）单击标签 Scale and Tics（Magnitude），改为 Logarithmic。

（14）将 Min 改为 5，Max 改为 20000。

（15）单击 Scale and Tics（Phase），将 Tics per axis 改为 7。

（16）单击 Horizontal 或通过下拉菜单列表改变它，并将 Min 改为 5，Max 改为 1 000，如图 2-83 所示，曲线显示如图 2-84 所示。

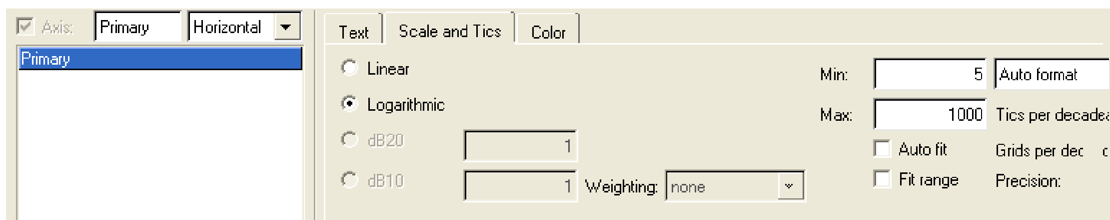


图 2-83　表格显示控制面板

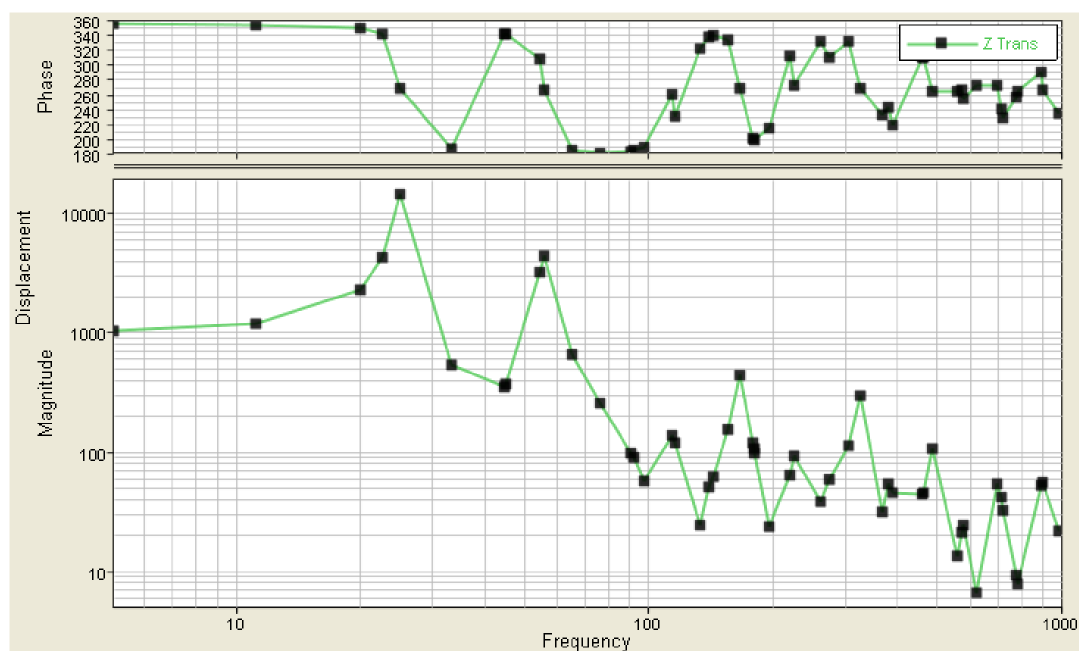


图 2-84　显示结果曲线

（17）频率响应函数 （节点 3，*Z* 轴方向位移）。

（18）从工具条上的 File 下拉菜单中，选择 Save as 中的 Report Template。

（19）在 File name 处输入 FRF_template.tpl。

（20）单击 Save 按钮。

（21）单击 Coordinate info 。

（22）单击 Magnitude 按钮，如图 2-85 所示。

（23）单击 maximum 按钮在表格中看到 *Y* 轴最大值为 15055.4（初始模型的峰值位移），如图 2-86 所示。

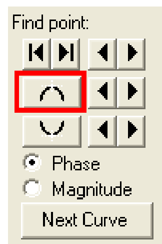


图 2-85 按钮选择

Find point: Phase / Magnitude / Next Curve

Curve:	Z Trans	
Point:	4	
X:	24.9594	
Y:	271.361	15055.4
Slope:	-14.7544	-374.563
Time:	24.9594	

Pt	X	Y-phase	Y-magnitude
3	22.6876	344.92	4494.71
4	24.9594	271.361	15055.4
5	33.2049	189.744	555.319
6	44.685	344.628	368.023
7	44.9354	344.86	385.858
8	54.6086	309.853	3323
9	55.8562	268.651	4537.66

Show Y-pha as: Linear / dB10 / dB20
Show Y-mag as: Linear / dB10 / dB20

图 2-86 查看数值

这包括处理 HyperGraph 结果。

（24）利用文本编辑器打开位移文件（.disp），如图 2-87 所示。

```
        1            1      2.495944E+01 EIGV:          1  subcase1
           3 1.62766E-19 1.10219E-18 9.61302E+02 1.70796E+01-2.81851E+00 3.19619E-20
```

图 2-87 使用文本编辑器查看结果文件

第一行的第一项为迭代步数，第二项为数据点个数，第三项为迭代频率。

接下来的一行是位移响应 AMP（*X*，*Y*，*Z*）和 PHASE（*X*，*Y*，*Z*），正如我们所看到的 *Z* 向自由度在所有状况中占主导地位。

（25）从 File 菜单中，选择 Exit 命令退出 Hyperview。

STEP 14 定义拓扑优化设计变量

（1）从 Analysis 页，单击进入 optimization 面板。

（2）单击 topology，进入该面板。

（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（4）单击 DESVAR=，输入 plate 并按〈Enter〉键。

（5）单击 props。

（6）勾选 Design 旁的复选框，单击 select。

（7）将 type 切换到 PSHELL。

（8）设置基本厚度，切换到 base thickness =。

（9）在 base thickness =处输入 0.15。

（10）单击 create 按钮。

（11）单击 parameters 按钮。

（12）将 minmemb off 切换到 mindim，并输入 2。

（13）将 maxmemb off 切换 maxdim，并输入 6。

（14）单击 update。

这样就创建了拓扑设计空间 plate。属性集合器 design 中的所有单元（即组件集合器 design 内的所有单元）均包含在拓扑设计空间。这些壳单元的厚度变化范围在 0.15（上面定义的基本厚度）到最大厚度（已在 PSHELL 卡片中定义的厚度）。

该练习的目的是为了确定设计区域中加强筋的放置位置。所以定义了一个非零的基础厚度，它作为壳的初始厚度。在 PSHELL 卡片中定义的最大厚度，即为加强筋的允许厚度。

现在 PSHELL 卡片中壳的初始厚度值仍为 0.15，需将其改为更大的值，用于将设计空间中的材料去除。

（15）单击 return 按钮，返回 optimization 面板。

（16）在工具条上单击 Card Editor 。

（17）单击 props 按钮，勾选 design 旁的复选框。

（18）单击 select。

（19）单击 edit。

（20）弹出设计组件集合器的 PSHELL 卡片设置界面。

（21）将 T 值用 1.000 代替原来的 0.150。

（22）单击两次 return 按钮，返回 optimization 面板。

STEP 15 创建响应

在 OptiStruct User's Guide（OptiStruct 用户手册）下的 Responses 部分可以找到关于可用响应的详细描述。

这里将定义两个响应：

✓ 频率响应位移（约束）。

✓ 总体积响应（目标）。

（1）选择 responses 面板。

（2）在 response =处输入 frfdisp。

（3）单击 response type 下的切换器，从弹出的菜单中选择 frf displacement。

（4）确认切换到 magnitude（幅值），函数切换到 all freq。

（5）单击 nodes 按钮，选择节点号为 3。

（6）选择 dof3 旁的按钮。

（7）单击 create 按钮。

Z 方向上位移自由度的最大幅值定义为响应 frfdisp。

（8）在 response =处输入 volume。

（9）单击 response type 下的切换器，从弹出的菜单中选择 volume（from the pop-up menu）。

（10）确认切换到 total。

（11）单击 create 按钮。

（12）设计空间的体积定义为响应 volume。

（13）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

STEP 16 创建约束

在该问题中定义的工况中最大位移上限为 600mm。

（1）从 optimization 面板中选择 dconstraints。

（2）在 constraint=处输入 constr。

（3）单击 response=，从响应列表中选择 frfdisp。

（4）勾选 upper bound =左侧的复选框。

（5）在 upper bound =处输入 600。

（6）单击 loadstep，选择 subcase1。

（7）单击 create 按钮。

（8）单击 return 按钮，回到 optimization 面板。

STEP 17 定义目标

（1）从 optimization 面板中选择 objective。

（2）单击 response =，选择 volume response。

（3）单击 create 按钮。

（4）单击两次 return 按钮，退出面板。

STEP 18 运行优化计算

（1）从 Analysis 页，单击 OptiStruct。

（2）单击 input file 后的 save as。

（3）选择 OptiStruct 模型文件保存的目录，在 File name 处输入 frf_response_optimization.fem，单击 Save 按钮。

（4）注意在 input file 栏中出现 frf_response_optimization.fem 文件的名字和位置。

（5）单击 export options 切换到 all。

（6）单击 run options 切换到 optimization。

（7）单击 memory options 切换到 memory default。

（8）单击 OptiStruct。

OptiStruct 求解器开始计算。如果计算成功，OptiStruct 模型所在文件夹将写入新的结果文件，则可以在文件 frf_response_optimization.out 中检查错误信息。如果有任何错误，则该

文件可帮助检查输入卡。

STEP 19 查看密度结果的静态图

从 OptiStruct 中，输出每个迭代步的单元密度和厚度结果。该部分讲解如何在 HyperView 中查看新设计的等值面图。

（1）单击 OptiStruct 面板中的 HyperView 按钮。

（2）启动 HyperView，载入文件 frf_response_optimization.mvw。

（3）出现一个显示结果文件位置的消息框。

（4）单击 Close 按钮，退出 Message Log。

（5）单击 Contour。

（6）单击，选择仿真列表中的最后一个迭代步。

（7）将 averaging method 改为 Simple。

（8）在 contour 面板中单击 Apply 按钮。云图显示如图 2−88 所示。

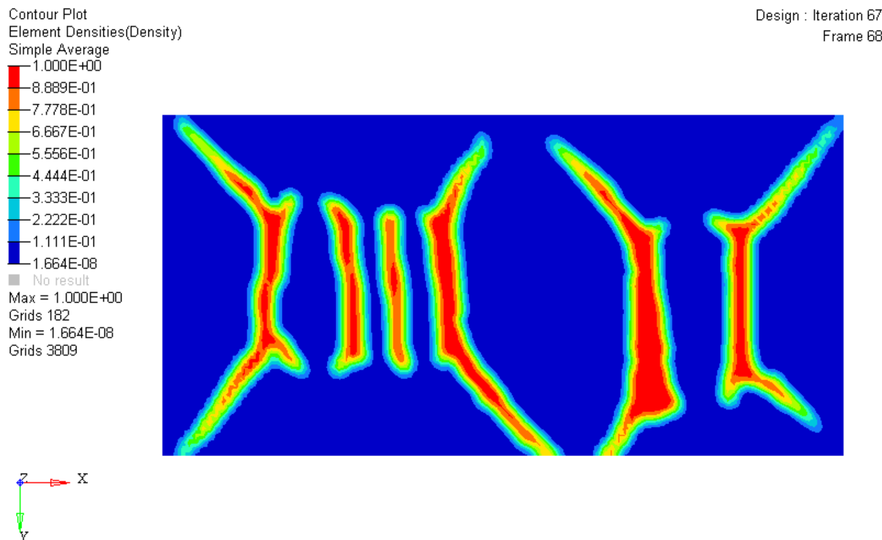


图 2−88　优化结果单元密度云图

分配给模型中的每个单元的图例颜色，表明已选迭代步下每个单元的厚度。最后一个迭代步给出的材料优化布置。

STEP 20 查看优化结果的峰值位移

（1）从 File 菜单中选择 Open 中的 Report Template。

（2）从文件浏览窗口，选择 FRF_templater.tpl，单击 Open。

（3）将 PLOT_FILE_1 改为 frf_response_optimization_s1_d.67.frf，确认在选择了 Append 选项，单击 Apply 按钮。曲线显示如图 2−89 所示。

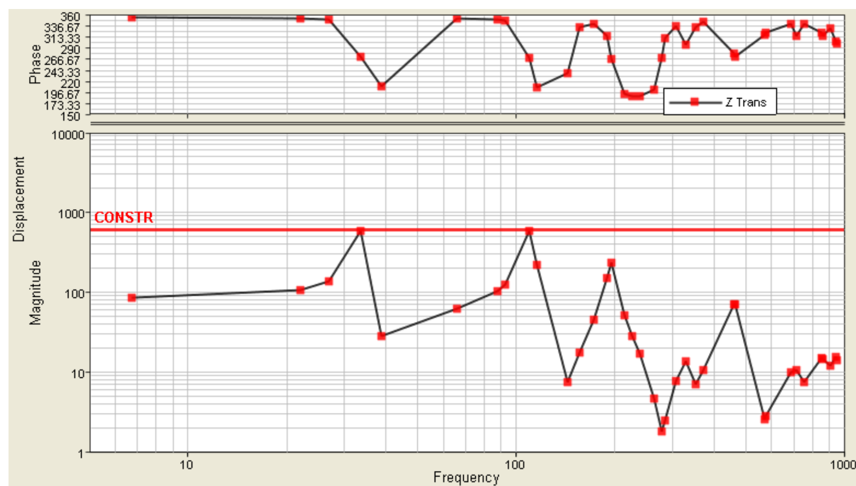


图 2-89　新设计中节点 3 的频率响应（峰值响应值：在 109.35Hz 处为 599.027）

STEP 21 对比结果

（1）从 File 菜单中选择 Open 中的 ReportTemplate，选择 FRF_templater.tpl，单击 Open 按钮。

（2）将 PLOT_FILE_1 改为 frf_response_analysis_s1_d.frf。

（3）确认在选择了选项 Append，单击 Apply 按钮。曲线显示如图 2-90 所示。

（4）单击 Page Window Layout 按钮，选择布置样式。

（5）单击 Previous Page 按钮，从 Edit 菜单中，选择 Copy 中的 Window。

（6）单击 Next Page 按钮，选择第二个窗口。

（7）从 Edit 菜单中单击 Past Window。

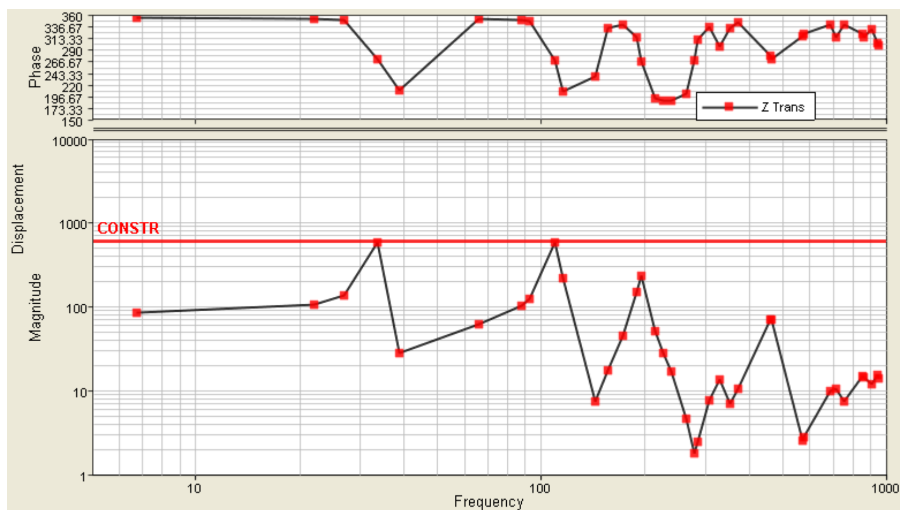


图 2-90　初始频率响应

（8）单击 Datum Lines ，单击 Add 按钮。

（9）输入标签 CONSTR，在 Position 处输入 600。

（10）改变 Line Attributes 和 Text 的位置，与图 2-96 相匹配。

（11）单击 Headers/Footers 按钮，如图 2-91 所示，为第一窗口输入 INITIAL，为第二窗口输入 FINAL，分别单击 Apply 按钮。

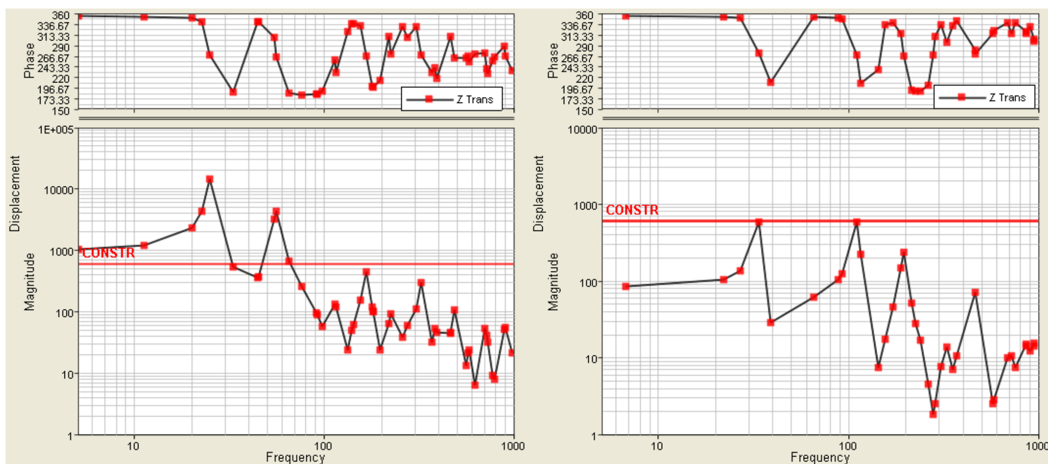


图 2-91　初始和最终设计的 FRF 响应对比

2.8　拓扑优化卡片

请先做完实例或者熟悉形状优化技术，然后查看卡片了解更多内容。

DTPL 卡片定义拓扑优化设计变量和参数。基本卡片格式如表 2-5 所示。

表 2-5　DTPL 卡片参数格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DTPL	ID	PTYPE	PID1	PID2	PID3	PID4	PID5	PID6	
		PID7							

用于定义最小厚度的选项如表 2-6 所示。

表 2-6　定义最小厚度选项

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
	TMIN	T0							

用于定义应力约束的可选扩展项如表 2-7 所示。

表 2−7　定义应力约束扩展选项

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
	STRESS	UBOUND							

用于定义最小尺寸约束的可选扩展项如表 2−8 所示。

表 2−8　定义最小尺寸约束扩展选项

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
	MEMBSIZ	MINDIM	MAXDIM	MINGAP					

用于定义网格类型的可选扩展项如表 2−9 所示。

表 2−9　定义网格类型选项宽展选项

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
	MESH	MTYP							

用于定义拔模方向约束的可选扩展项如表 2−10 所示。

表 2−10　定义拔模方向约束扩展选项

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
	DRAW	DTYP	DAID/XDA	YDA	ZDA	DFID/XDF	YDF	ZDF	
	OBST	OPID1	OPID2	OPID3	OPID4	OPID5	OPID6	OPID7	
		OPID8							
	NOHOLE								
	STAMP	TSTAMP							

用于定义挤压约束的可选扩展项如表 2−11 所示。

表 2−11　定义挤压约束的可扩展选项

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
	EXTR	ETYP							
	EPATH1	EP1_ID1	EP1_ID2	EP1_ID3	EP1_ID4	EP1_ID5	EP1_ID6	EP1_ID7	
		EP1_ID8							
	EPATH2	EP2_ID1	EP2_ID2	EP2_ID3	EP2_ID4	EP2_ID5	EP2_ID6	EP2_ID7	
		EP2_ID8							

用于定义模式重复约束中控制部分的可选扩展项如表 2−12 所示。

表 2-12　定义模式重复约束中控制部分的可选扩展项

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	MASTER								
	COORD	CID	CAID/XCA	YCA	ZCA	CFID/XCF	YCF	ZCF	
			CSID/XCS	YCS	ZCS	CTID/XCT	YCT	ZCT	

用于定义模式重复约束中受控部分的可选扩展项如表 2-13 所示。

表 2-13　定义模式重复约束中受控部分的可选扩展项

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	SLAVE	DTPL_ID	SX	SY	SZ				
	COORD	CID	CAID/XCA	YCA	ZCA	CFID/XCF	YCF	ZCF	
			CSID/XCS	YCS	ZCS	CTID/XCT	YCT	ZCT	

用于定义模式组约束的可选扩展项如表 2-14 所示。

表 2-14　定义模式组约束的可选扩展项

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	PATRN	TYP	AID/XA	YA	ZA	FID/XF	YF	ZF	
		UCYC	SID/XS	YS	ZS				

当 PTYPE 为 COMP 时，用于定义材料的可选扩展项如表 2-15 所示。

表 2-15　针对 PTYPE\COMP 定义材料的可选扩展项

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	MAT	MATOPT							

用于定义疲劳约束的可选扩展项如表 2-16 所示。

表 2-16　定义疲劳约束的可选扩展项

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	FATIGUE	FTYPE	FBOUND						

示例 1：

表 2-17 定义的拓扑设计变量表明对应 PSHELL 属性编号 7,8 和 17 的组件厚度变化范围为 1～5（编号 7,8 和 17 的 PSHELL 属性中初始厚度定义为 5）。已优化设计中的成员宽度不能小于 60 个单位。

表 2-17　示例 1 卡片定义

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DTPL	1	PSHELL	7	8	17				
	MEMBSIZ	60.0							
	TMIN	1.0							

示例 2：

表 2-18 为对应 PSOLID 属性编号 4,5 和 6 的组件定义拓扑设计变量。已优化设计中的成员尺寸不能小于 60 个单位。最终设计利用铸造工艺进行加工，拔模方向沿着 *x* 轴。对应 PSOLID 属性编号 10,11 和 12 的组件虽是非设计部分，但像可设计组件一样也会形成同样的铸造部分。

表 2-18　示例 2 卡片定义

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DTPL	1	PSOLID	4	5	6				
	MEMBSIZ	60.0							
	DRAW	SPLIT	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	
	OBST	10	11	12					

DTPL 卡片关键字的解释如表 2-19 所示。

表 2-19　DTPL 卡片关键字的解释

关　键　字	描　　述
ID	每个 DTPL 卡片必须有一个单独的编号 没有默认值（大于 0 的整数）
PTYPE	DTPL 卡片中定义的属性类型，如 PBAR， PBARL，PBEAM，PBEAML，PBUSH，PROD, PWELD，PSHELL，PCOMP 或 PSOLID 没有默认值（PBAR，PBARL，PBEAM， PBEAML，PBUSH，PROD，PWELD， PSHELL，PCOMP 或 PSOLID）
PID#	属性编号，列出 DTPL 卡片适用范围的属性类型 PTYPE 下的属性。如果 DTPL 卡片适用范围为模型中属性类型 PTYPE 下的所有属性，则在 PID1 栏中使用 ALL 如果没有列出 PIDs，OptiStruct 将检查属性类型 PTYPE 下的所有属性，确定它们是否属于设计空间（查看关于PCOMP，PSHELL和PSOLID的帮助部分）。如果任何属性都满足该查找，则该卡片将对它们全部起作用。在这种情况下（没有定义 PIDs），对于给定的 PTYPE 只能定义一个 DTPL 卡片 默认为空 （大于 0 的整数，空或 ALL）
TMIN	只有 PTYPE 为 PSHELL 时，标记 TMIN 才表明需要满足的最小厚度值 如果 PTYPE 不是 PSHELL，则最小厚度默认为卡片 PSHELL 中定义的 T0 值。如果卡片 PSHELL 中没有定义 T0 值，那么最小厚度默认为 0.0
T0	当相关材料类型为 MAT1 时，T0 代表 PSHELL 属性的最小厚度 如果 PSHELL 的相关材料类型不是 MAT1 时，则忽略该值，并将 T0 设为 0.0 如果在 T0 处没有输入任何值，则将使用卡片 PSHELL 中的 T0 值。如果卡片 PSHELL 中没有定义 T0，则将 T0 设为 0.0 默认为空 （不小于 0 的实数）
STRESS	标记 STRESS 表明激活了应力约束，需要满足应力上限值。查看下面的 comment 1
UBOUND	应力上限约束 没有默认值（大于 0 的实数）
MEMBSIZ	标记 MEMBSIZ 表明激活了与列出属性相关的成员尺寸约束，需要满足 MINDIM 和可能的 MAXDIM
MINDIM	指定构成成员的最小尺寸。该命令用于避免小成员。它也能避免棋盘格式的结果。查看下面的 comment 2 默认没有最小成员尺寸控制（大于 0 的实数）
MAXDIM	指定构成成员的最大尺寸。该命令用于避免形成大尺寸成员。它只能联合 MINDIM 使用。查看下面的 comment 3 默认没有最大成员尺寸控制（大于 0 的实数）

（续）

关　键　字	描　　述
MINGAP	定义形成的结构成员之间的最小空间。该命令只能联合 MAXDIM 使用。查看下面的 comment 3 默认为空（大于 MAXDIM 值的实数）
MESH	标记 MESH 表明需要满足的网格类型信息
MTYP	表明网格遵循优化人员设定的规则。现在只有 ALIGN 选项可用。ALIGN 表明当激活加工约束时，网格沿拔模方向或挤压路径对齐。查看 comment 4 默认为空（ALIGN 或空）
DRAW	标记 DRAW 表明施加了铸造约束，需遵循的拔模方向信息 只有 PTYPE 等于 PSOLID 时，拔模约束有效。否则，当是其他 PTYPE 时，OptiStruct 将因错误终止
DTYP	将用到的拔模方向约束的类型，从 SINGLE，SPLIT，SPLIT2 或 SPLIT3 中选择。SINGLE 表明使用单项拔模，按着给定拔模方向进行拔模。SPLIT 允许双面拔模优化，按着给定拔模方向进行拔模。SPLIT2 和 SPLIT3 提供了可替换方法用优化拔模面。它们只能用于 SPLIT 创建非拔模腔的情况 默认为 SPLIT （SINGLE，SPLIT，SPLIT2 和 SPLIT3）
DAID/XDA, YDA, ZDA	拔模方向固定点。这些项定义了铸造拔模方向的固定点。该点可以通过在 DAID 栏中输入一个节点号定义或者在 XDA,YDA 和 ZDA 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义 默认为 origin （在三项为实数或在第一项为整数）
DFID/XDF, YDF, ZDF	用于拔模方向定义的向量方向。这些项定义一个点。向量从固定点指向该点。该点可以定义为通过输入该点可以通过在 DFID 栏中输入一个节点号定义或者在 XDF,YDF 和 ZDF 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义 没有默认值 （在三项为实数或在第一项为整数）
OBST	标记 OBST 列出属于非设计部分的 PIDs，但对于定义的拔模方向，需考虑它们与可设计部分的相互关系。OBST 代表 obstacle 只有当在相同的 DTPL 卡片中出现标记 DRAW 时，才能识别出 OBST。如果标记 OBST 没有同标记 DRAW 一起出现，OptiStruct 将由于错误而终止
OPID#	obstacle 属性编号。 列出对于定义的拔模方向需考虑的并对应于非设计部分的属性，这些必须是 PSOLID 无默认值 （大于 0 的整数，空或 ALL）
NOHOLE	防止在拔模方向上形成通孔。注意它并不阻止在垂直拔模方向上形成孔。在拔模方向上假定的最小厚度是平均单元尺寸的 2 倍
STAMP	标记 STAMP 强迫设计发展为 3-D 壳结构，并表明需满足厚度 TSTAMP。查看 comment 5
TSTAMP	定义 3-D 壳结构的厚度，由选项 STAMP 发展而来。推荐的最小厚度是 3 倍的平均单元尺寸。查看 comment 5 没有默认值（大于 0 的实数）
EXTR	标记 EXTR 表明施加了挤压约束，需要遵循的挤压信息 只有当 PTYPE 为 PSOLID 时，EXTR 可用。如果 EXTR 出现在其他 PTYPE 中，OptiStruct 将因为错误而终止
ETYP	将用到的挤压约束的类型，从 NOTWIST 或 TWIST 中选择。NOTWIST 表明横截面不绕中间轴扭曲，只需定义一个路径。TWIST 表明横截面可绕中间轴扭曲，需定义两个路径 默认为 NOTWIST （NOTWIST 或 TWIST）
EPATH1	标记 EPATH1 表明根据一列节点号定义主要挤压路径 只有当在相同的 DTPL 卡片中出现标记 EXTR 时，才能识别出 EXTR。如果标记 EPATH1 没有同标记 EXTR 一起出现，OptiStruct 将由于错误而终止
EP1_ID#	主要挤压路径编号。列出的节点号定义主要挤压路径 没有默认值 （大于 0 的整数或 blank）
EPATH2	标记 EPATH2 表明根据一列节点号定义次要挤压路径。只有当 ETYP 为 TWIST 时，需定义 EPATH2 只有当在相同的 DTPL 卡片中出现标记 EXTR 时，才能识别出 EXTR。如果标记 EPATH2 没有同标记 EXTR 一起出现，则 OptiStruct 将由于错误而终止
EP2_ID#	次要挤压路径编号。列出的节点号定义次要挤压路径 没有默认值（大于 0 的整数或 blank）
MASTER	标记 MASTER 表明该设计变量作为主模式应用于模式重复。查看 comment 7

（续）

关　键　字	描　　述
COORD	标记 COORD 表明与模式重复所遵循的坐标系相关的信息。如果有出现标记 MASTER 或 SLAVE，则将需要该部分
CID	用于模式重复坐标系的直角坐标系编号。查看 comment 7 默认为 0（大于 0 的整数）
CAID/XCA, YCA, ZCA	模式重复坐标系的固定点。该点可以通过在 CAID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCA,YCA 和 ZCA 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 7 没有默认值（在三项为实数或在第一项为整数）
CFID/XCF, YCF, ZCF	模式重复坐标系的第一点。该点可以通过在 CFID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCF,YCF 和 ZCF 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 7 没有默认值（在三项为实数或在第一项为整数）
CSID/XCS, YCS, ZCS	模式重复坐标系的第二点。该点可以通过在 CSID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCS,YCS 和 ZCS 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 7 没有默认值（在三项为实数或在第一项为整数）
CTID/XCT, YCT, ZCT	模式重复坐标系的第三点。该点可以通过在 CTID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCT,YCT 和 ZCT 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 7 没有默认值（在三项为实数或在第一项为整数）
SLAVE	标记 SLAVE 表明这个设计变量从属于对象 DTPL_ID 参考的主模式重复。查看 comment 7
DTPL_ID	对应于主模式定义的 DTPL 编号 没有默认值（大于 0 的整数）
SX, SY, SZ	分别对应于模式重复在 X，Y 和 Z 方向各自的比例缩放因子。查看 comment 7 默认是 1.0 （大于 0 的实数）
PATRN	标记 PATRN 表明为列出的属性激活了模式组及模式组需要遵循的信息 只有 PTYPE 为 PCOMP，PSHELL 和 PSOLID 时，模式组有效。否则，当是其他 PTYPE 时，OptiStruct 将因错误终止
TYP	表明模式组需要的类型。查看 comment 10 默认没有模式组（1，2，3，9，10 和 11）
AID/XA, YA, ZA	模式组的固定点。该点可以通过在 AID 栏中输入一个节点号定义或者在 XA,YA 和 ZA 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 10 默认为 origin （在三项为实数或在第一项为整数）
FID/XF, YF, ZF	模式组的第一点。该点可以通过在 FID 栏中输入一个节点号定义或者在 XF,YF 和 ZF 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 10 没有默认值（在三项为实数或在第一项为整数）
UCYC	周期对称中周期重复的数目。该项定义了周期对称中放射楔形的数目。每个楔形的角度是 360.0 / UCYC。查看 comment 10 默认为空 （大于 0 的整数或空）
SID/XS, YS, ZS	模式组的第二点。该点可以通过在 SID 栏中输入一个节点号定义或者在 XS,YS 和 ZS 中输入 X,Y 和 Z 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 10 没有默认值（在三项为实数或在第一项为整数）
MAT	表明复合材料拓扑优化类型。只有 PTYPE 为 PCOMP 时，才考虑该项
MATOPT	PLY：表明优化将作用在板层水平上。拓扑设计变量单独作用在每层。该方法允许优化程序去决定每个单元的最佳方向 HOMO：表明该优化施加到均匀化的壳上。这是在前一个版本 OptiStruct 中使用的方法 默认为 PLY
FATIGUE	标记 FATIGUE 激活了疲劳约束和需遵循它们的定义
FTYPE	指定疲劳约束的类型，它可以是 DAMAGE 或 LIFE
FBOUND	指定边界值。如果 FTYPE 是 DAMAGE，则 FBOUND 是疲劳破坏的上限。如果 FTYPE 是 LIFE，则 FBOUND 将是疲劳寿命的下限 没有默认值（实数）

DTPG 卡片关键字的更多解释如下。

（1）可以通过 DTPL 或 DSIZE 卡片中可扩展选项 STRESS 定义 Von Mises 应力的约束。有很多关于该约束的限制：

- ✓ 定义的应力约束受限于单一的 von Mises 许可应力。当在结构中存在具有不同许可应力的材料时，肯定会出现异常拓扑现象。异常拓扑是指与应力约束的条件本质相关的问题，也就是，当单元消失时，单元的应力约束也就消失了。这将产生另外的问题，由于存在很多缩减的问题，基于梯度的优化程序不能在全局设计空间中找到解决方案。
- ✓ 不允许对结构的局部区域进行应力约束，因为随着局部区域的消失，所有的应力约束都将移除，常会产生一个病态优化问题。所以，当应力约束施加于包括设计区域和非设计区的整个模型时，才有效。在所有的 DSIZE 和 DTPL 卡片中，应力约束设置必须一致。
- ✓ 嵌入的程序能够过滤掉载荷施加点和边界约束点处的人为应力集中。由于几何边界而产生的应力集中也将在一定程度上被过滤掉，因为通过局部形状优化能更有效地提高。
- ✓ 由于在大量单元上施加了应力约束，在.out 文件的保留约束表格中没有给出单元应力报告。用户可以在 HyperView 或 HyperMesh 中查看模型的应力状态迭代历程。
- ✓ 应力约束不能施加到 1-D 单元。
- ✓ 当模型中有强迫位移时，不能使用应力约束。

（2）MINDIM 的推荐值最小是平均单元尺寸的 3 倍，最大为 12 倍，可以在这个范围内选择。当激活了模式组、拔模方向或挤压约束，强制 MINDIM 值为 3 倍的平均单元尺寸，如果用户设定的值小于该值，则由该值取代。然而，在 MINDIM 大于 12 倍平均单元尺寸的情况下，不论是否定义加工约束，该值都将重置为等同 12 倍平均单元尺寸的值。

如果定义了 MINDIM，但没定义加工约束，当 PTYPE=PSHELL 或 PSOLID 时，就算定义值小于推荐值，它也不会重置为推荐的下限值；当 PTYPE=PCOMP 时，即使加工约束，MINDIM 也将重置。

（3）MAXDIM 值应该至少为 MINDIM 值的两倍，如果 MAXDIM 的值小于平均单元边长的 6 倍，则 OptiStruct 将因错终止。

MAXDIM 的约束在设计问题中引入了有效限制。所以，只有它作为一个必要的设计要求时，才需要。为了对比该附加约束的作用，应实施没有 MAXDIM 的研究。

MAXDIM 意味着应用与 MAXDIM 值相同的 MINGAP 约束。因此，为了使 MINGAP 更有效，它需要比 MAXDIM 更大。

在 MAXDIM 定义时，应该注意体积分数低于 50%体积约束，MINGAP 增加将导致体积进一步减小。

（4）可联合拔模方向或挤压加工约束使用“MTYP"ALIGN"”，用于指出沿着拔模方向或挤压路径对齐网格。

如图 2−92 所示，沿着拔模方向 1 而不是拔模方向 2 对齐 Mesh 1。

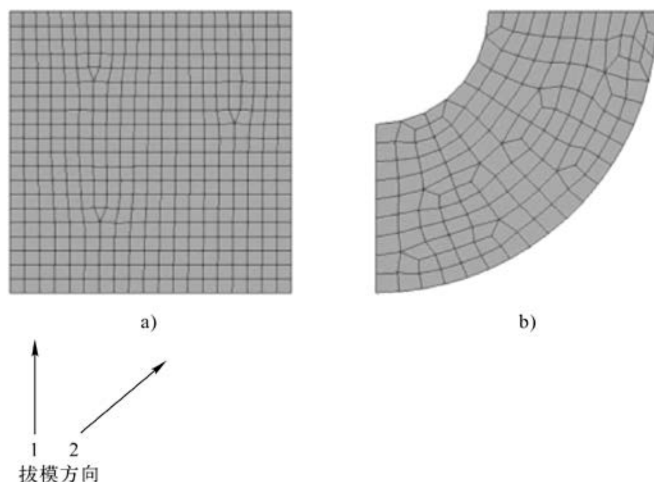


图 2−92　拔模方向示例

a) 网格 1　b) 网格 2

用户可联合加工约束（最小成员、最大成员、模式组及模式重复）使用“MTYP"ALIGN"”，而不是拔模方向及挤压，也可考虑为这些加工约束对齐 Mesh 1。

在这两种情况下，将使 OptiStruct 使用更小的最小成员尺寸和最大成员尺寸。默认的最小成员尺寸是平均单元尺寸的 3 倍；在网格对齐情况下，默认尺寸可以是平均单元尺寸的 2 倍。如图 2−92 所示，Mesh 2 没有对齐。

（5）只有对于单一薄板，冲压约束才有效，通过联合 STAMP 和 DTYP 定义单向冲压。

冲压厚度 TSTAMP 推荐选择不小于 3 倍的平均单元尺寸。如果定义的 TSTAMP 值小于最小推荐值，则将重置 TSTAMP 为最小推荐值。

联合 STAMP 和 NOHOLE 有利于产生一个持续/散布的壳结构。

注意应关注厚度和目标体积的兼容性。

（6）挤压约束不能联合拔模方向约束一起使用。

（7）模式重复允许关联设计域中的相似区域，使得产生相似的拓扑分布。通过定义 Master 和 Slave 区域来实现。一个 DTPL 卡片应该只包含一个 MASTER 标记或 SLAVE 标记。在包含 SLAVE 标记的任何 DTPL 卡片中不能导出参数。对于 Master 和 Slave 区域，都需要定义由标记 COORD 描述的模式重复坐标系。为使用对称，坐标系可能是左手定则或右手定则的笛卡儿坐标系。坐标系可以通过下面列出的按照优先顺序排列的两种方法之一来定义。

✓ 定义 4 个点，下面利用这些点来定义坐标系（它是为定义左手定则坐标系的位移方法）：

−从固定点指向第一点的向量定义为 x 轴。

−第二点位于 x−y 平面，表明了 y 轴正向。

−第三个点定义 z 轴正向。

✓ 定义直角坐标系和一个固定点。如果只定义了一个固定点，则假定使用全局坐标系。

−多个 Slaves 可参照相同的 Master。

−可为 Slave 区域定义缩放系数，允许调整 Master 的布局。

对于更多的细节描述，可参考包含 User's Guide 中Manufacturability for Topology Optimization部分中的Pattern Repetition页。

（8）模式组只适用于 PCOMP、PSHELL 和 PSOLID 组件。

（9）由于历史原因，标记 SYMM 可取代标记 PATRN 使用。

（10）模式组现在有 6 个选项。

- ✓ plane symmetry（TYP = 1）：该类模式组需要定义固定点和第一点。从固定点指向第一点形成的向量垂直于中间平面。
- ✓ plane symmetry（TYP = 2）：该类模式组需要定义固定点、第一点和第二点。从固定点指向第一点形成的向量垂直于第一中间平面。第二点沿法向投影到第一中间平面。从固定点指向投影点形成的向量垂直于第二中间平面。
- ✓ plane symmetry（TYP = 3）：该类模式组需要定义固定点、第一点、第二点和第三点。从固定点指向第一点形成的向量垂直于第一中间平面。第二点沿法向投影到第一中间平面。从固定点指向投影点形成的向量垂直于第二中间平面。第三对称面过固定点，并垂直于已定义的第一和第二中间平面。
- ✓ Uniform（TYP = 9）：该类模式组不需要定义任何附加输入。
- ✓ Cyclic（TYP = 10）：该类模式组需要定义固定点，第一点和周期重复个数。从固定点指向第一点形成的向量定义对称轴。
- ✓ Cyclic with symmetry（TYP = 11）：该类模式组需要定义固定点、第一点、第二点和周期重复个数。从固定点指向第一点形成的向量定义对称轴。固定点、第一点和第二点全部散布在中间平面上。中间平面位于每个周期重复的中心。

2.9　小结

本章 7 个实例比较全面地演示了应用 OptiStruct 进行结构优化设计的软件操作过程。对于实际的工程项目，还需要考虑下面因素，以便得到有价值的拓扑优化结果。

- ✓ 优化模型的建模。对于实体零部件，采用四面体建模即可，无需花费大量时间进行六面体网格建模，因为拓扑优化的目的只是得到一个大概的结构设计方案供参考。如果时间足够，则新设计 CAD 模型建立后可采用六面体网格划分。
- ✓ 优化模型的规模。OptiStruct 可以求解包含数百万个变量（设计空间有数百万个单元）的拓扑优化问题，但此时对系统硬件要求，特别是内存要求很高，建议先试算然后再细化模型，以免出现优化模型太大而使现有硬件不能计算的情况。
- ✓ 优化部件的挑选。一般来讲，重量大的铸件和机加件比较有优化减重潜力，也可优先考虑需求量大（或者产量多）的部件，此时该部件即使只减重 1%，总的减重效果也将非常可观。
- ✓ 优化结果的材料无关性。一般来讲，拓扑优化结果由载荷边界条件和具体约束值决定，同材料类型关系不大，因此，对于某些非线性材料或者材料数据不全的零部件，可先假定为某种线性材料（OptiStruct 只能处理线性材料模式）进行优化。
- ✓ 优化结构的解释。优化结果的解释，一般来讲“依葫芦画瓢”即可，但更重要的是理解保留下来的材料的作用，从而设计出相应的结构。例如，如果优化结果中某部分的材料主要是抗弯，则可设计为类工字形结构；该部分结构抗扭，可设计成类圆管结构或者盒装结构。

第 3 章

形貌优化技术实例



形貌优化技术广泛应用于提高各种冲压板件的性能，如减少变形，提高模态频率，减少振动等。

在形貌优化中，设计空间由大量的节点波动向量组成，这些节点波动向量按照一定的模式进行组合以满足设计约束，并最终生成优化后的最佳形貌。形貌优化和拓扑优化都是概念设计阶段的技术，两者的求解方法也类似。

本章通过 4 个实例介绍形貌优化技术在提高零部件刚度方面的应用。

本章重点知识

3.1　实例：受扭平板的形貌优化
3.2　实例：利用拓扑和形貌联合优化磁头悬臂
3.3　实例：汽车安全带牵引器支架形貌优化
3.4　形貌优化卡片简介
3.5　autobead 模块简介
3.6　小结

3.1 实例：受扭平板的形貌优化

本实例介绍如何对受扭平板进行形貌优化。可设计部分的有限元模型及其载荷和约束如图 3-1 所示。假设平板是冲压成形的，优化的目标是使施加力处的节点沿 *z* 轴正方向位移最小，为达到优化目标，只改变平板的形状，但不能改变厚度。

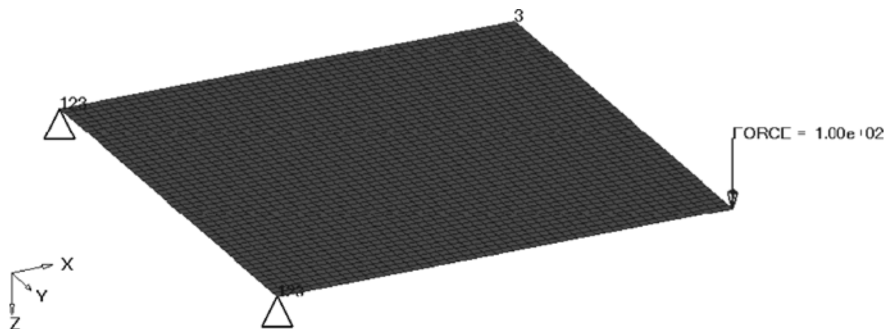


图 3-1 有限元模型及其载荷和约束

优化问题描述如下。

√ 设计目标：最小化载荷施加位置处的节点位移。

√ 设计变量：设计空间中自动生成并与单元法向相关的形状变量。

本实例包括以下内容：

√ 在 HyperMesh 中设置形貌优化。

√ 后处理形貌优化结果。

√ 在优化过程中引入加工约束。

STEP 01 打开 HyperMesh，加载用户配置并打开文件

（1）启动 HyperMesh。

（2）在弹出的 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。这样就加载了用户配置。它包括与以 Bulk Data 格式组织模型的 RADIOSS 和 OptiStruct 相对应的 HyperMesh 的功能面板、宏菜单和导入器。

（3）可从工具条中的 Preferences 下拉菜单处选择 User Profiles。

（4）从工具条上的 File 下拉菜单中选择 Open。

在<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/OptiStruct/下选择文件 torsion_plate.hm。

（5）单击 Open 按钮，将模型载入 torsion_plate.hm 到 HyperMesh 中。

STEP 02 查看组件厚度

（1）从 Results Browser 中展开对象 Property。

（2）用鼠标右键单击 design，选择 Card Edit，如图 3-2 所示。

出现 PSHELL 卡片面板。在 OptiStruct 中与壳厚相关的信息存储在 PSHELL 卡片。确认厚度 *T* 设为 1.0。

（3）单击 return，返回主菜单。

（4）在 HyperMesh 中设置形貌优化。

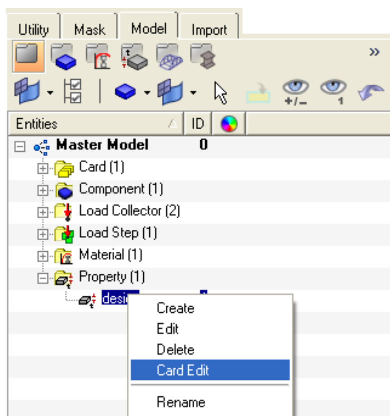


图 3-2　卡片编辑

STEP 03 为形貌优化定义设计变量

（1）形貌优化需要定义设计空间和 bead（加强筋），下面讲述具体操作。关于 bead 的更多信息，可以查看参考手册（the reference manual）中的 DTPG 卡片。

（2）单击 Analysis 中的 optimization。

（3）选择 topography 面板。

（4）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（5）单击 desvar=，输入 topo。

（6）单击高亮显示的 props。

（7）勾选 design 旁的复选框，单击 select。

（8）单击 create 按钮，为已选组件创建形状设计变量。

这就创建了形貌设计空间 topo。组件集合器 design 中的所有单元均属于设计空间。

（9）利用面板左侧的按钮，选择子面板 bead params。

（10）默认情况下，desvar =旁的栏中是新创建的设计空间名称。如果不是，则单击 desvar =，从形貌设计空间列表中选择 topo。

（11）在 minimum width=处输入 5.0。该参数控制模型中筋条的宽度。推荐值为单元平均宽度的 1.5～2.5 倍。

（12）在 draw angle=处输入 60.0（默认值）。该参数控制模型的起筋角。推荐值为 60°～75°。

（13）在 draw height=处输入 4.0。该参数控制模型中的起筋最大高度（HGT）。

（14）勾选 buffer zone 旁的复选框。该参数建立一个设计区域和非设计区域单元之间的缓冲区。

（15）将 draw direction 设为 normal to elements。该参数定义已创建的形状变量的方向。

（16）将 boundary skip 设为 load & spc。该选项告诉 OptiStruct 保留施加在设计空间外施加载荷和约束的节点。

（17）单击 update。

为设计空间 topo 创建了一个 bead（加强筋）的定义。基于以上信息，OptiStruct 将在设计变量区自动生成加强筋，类似参考手册中 DTPG 页所示内容。

（18）利用面板左侧的按钮，选择子面板 bounds。

（19）默认情况下，desvar =旁的栏中是新创建的设计空间名称 topo。如果不是，单击

desvar =，从形貌设计空间列表中选择 topo。

（20）单击 upper bound，输入 1.0（默认值）。

（21）控制节点移动的变量上限（UB>LB，默认为 1.0）。通过该项设置的节点移动上限等于 UB*HGT。

（22）单击 lower bound，输入 0.0（默认值）。

（23）单击 update。

（24）节点移动量上限为 UB*HGT，下限为 LB*HGT。

（25）单击 return，返回 optimization 面板。

STEP 04 定义响应

为目标定义一个响应：载荷施加处节点的位移。

（1）进入 responses 面板。

（2）在 response =处输入 displace。

（3）单击 response type 下的“转换”按钮，从弹出的菜单中选择 static displacement。

（4）单击 nodes，从弹出的拓展的对象选择框中选择 by id。

（5）输入 2500，按〈Enter〉键。这就选中了施加载荷的节点。

（6）选择 dof3。

（7）dofs 1、dofs 2、dofs 3 是沿 x、y 和 z 轴方向的线位移自由度。

（8）dofs 4、dofs 5、dofs 6 是绕 x、y 和 z 轴旋转的角自由度。

（9）total disp 是 x、y 和 z 轴方向的线位移的合成。

（10）total rotation 是绕 x，y 和 z 轴方向的角位移的合成。

（11）单击 create 按钮。

（12）将节点 2500 沿着 z 轴方向的线位移定义为响应 displace。

（13）单击 return，返回 optimization 面板。

STEP 05 定义目标

在本实例中，目标是最小化上一步中定义的位移响应。

（1）从 optimization 面板进入 objective。

（2）在左上角处单击选择器，在弹出的菜单中选择 min。

（3）单击 response =，从响应列表中选择 displace。面板中出现 loadstep 按钮。

（4）单击 loadstep 按钮，从工况列表中选择 torsion。

（5）单击 create 按钮，完成目标函数的定义。

（6）单击两次 return，返回主菜单。

STEP 06 提交计算

（1）从 Analysis 页面进入 OptiStruct 面板。

（2）单击 input file 后的 save as 按钮。

（3）选择 OptiStruct 模型文件保存的目录，在 File name 处输入 torsion_plate.fem。

（4）对于 OptiStruct 输入卡，建议使用扩展名.fem。

（5）单击 Save 按钮。注意到在 input file 栏出现 torsion_plate.fem 文件的名字和位置。

（6）单击 export options 切换到 all。

（7）单击 run options 切换到 optimization。

（8）单击 memory options 切换到 memory default。

（9）单击 OptiStruct。

OptiStruct 求解器开始计算。如果计算成功，则 OptiStruct 模型所在文件夹将写入新的结果文件，可以在文件 torsion_plate.out 中检查错误信息，如果有任何错误，则该文件可帮助检查输入卡。

形貌优化中重要的文件如表 3-1 所示。

表 3-1 形貌优化结果文件列表

torsion_plate.grid	在 OptiStruct 文件中写入扰动的节点数据
torsion_plate.hgdata	HyperGraph 文件，包括每次迭代的目标函数、欠约束百分比及约束的数据
torsion_plate.hist	用于 xy 图表的 OptiStruct 输出文件，包含目标函数、最大欠约束、设计变量、DRESP1 类型响应和 DRESP2 类型响应的迭代历程
torsion_plate.html	HTML 格式的优化报告，总结了问题描述和最后一步迭代的分析结果
torsion_plate.out	包含有文件配置的信息，优化问题配置的信息，对计算所需的内存和硬盘空间进行的评价，每次优化迭代的信息及计算时间信息的 OptiStruct 的输出文件。从该文件中可以检查在 torsion_plate.fem 优化结果文件生成过程中出现的警告和错误
torsion_plate_des.h3d	HyperView 二进制文件，用于形状改变的信息
torsion_plate_s1_h3d	HyperView 二进制文件，用于存储工况 subcase 1 的位移和应力结果
torsion_plate.sh	最后迭代所产生形状的文件。它包括分析中每个单元的材料密度，无用的尺寸参数及方位角。该文件可用于重新开始一个计算，如果需要，则为拓扑优化运行 OSSmooth 文件
torsion_plate.stat	总结分析进程，为分析过程的每步提供 CPU 信息

OptiStruct 输出全部迭代步的形状云图信息。另外，默认情况下输出首末两个迭代步的位移和应力结果。

STEP 07 查看静态的形状云图

（1）从 OptiStruct 面板单击 HyperView 按钮。

（2）启动 HyperView，载入文件 torsion_plate_des.h3d 和 torsion_plate_s1.h3d，读取模型和优化结果。

（3）单击 Close 按钮，关闭消息窗。

（4）单击工具条上的 Contour 按钮，进入 contour 面板。

（5）将 Result type 设为 Shape Change （v），type 设为 Mag，如图 3-3 所示。



图 3-3　结果控制面板设置

（6）单击按钮选择仿真列表中的最后一个迭代步。出现变形平板。

（7）单击 Apply 按钮。结果显示如图 3-4 所示。

是否 max=处显示 4.0e＋00？

在本实例中，是这样的。如果不是，则还需要继续优化。减小 OBJTOL 参数（可在 optimization 面板下的 opti control 中设置）。值 4.0e+00 源于已定义的起筋高度。

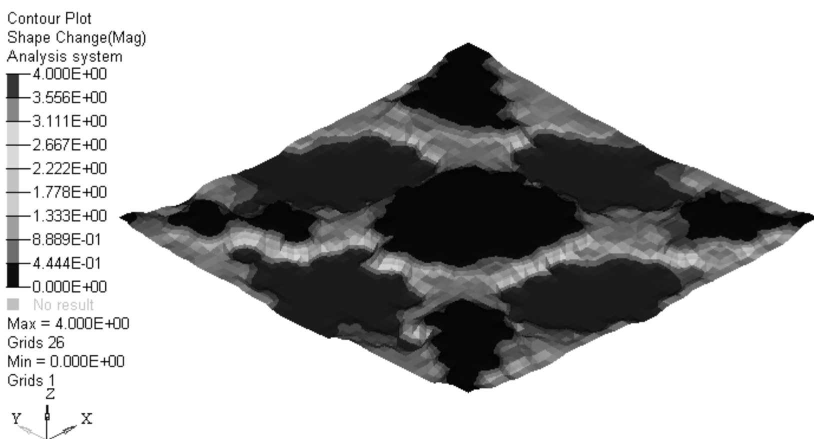


图 3-4　最后一步迭代中云图显示的加强肋样式（收敛结果）

STEP 08　查看形状云图变化的动画

通过形状云图的变形动画可以很好地了解各迭代步中形状变化的情况。

（1）确认动画样式菜单设为 Transient ，如图 3-5 所示。

（2）单击按钮，开始动画演示。

（3）单击按钮，打开 Animation Controls 面板。

（4）在动画演示过程中，利用面板左侧 Max Frame Rate 下方的滚动条调整动画的播放速度。

（5）单击按钮，停止动画演示。

STEP 09 查看结构变形

（1）默认情况下，文件 torsion_plate_s1.h3d 中有首末两个迭代步的位移和应力结果。

（2）单击按钮，进入下一页。

（3）该页是文件 torsion_plate_s1.h3d 中的工况信息。

（4）确认动画样式菜单设为 Linear Static。

（5）为更好地查看该模型的情况，打开网格线和结果云图。

（6）单击工具条中的 Deformed 按钮进入面板。

（7）设 Result type 为 Displacement（v）。

（8）从图显示的 Results Browser 中选择第一步迭代（Iteration 0），如图 3-6 所示。

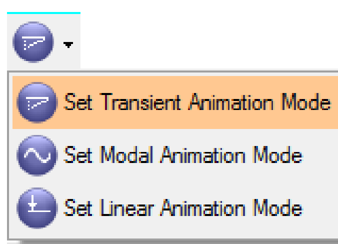


图 3-5 动画控制按钮

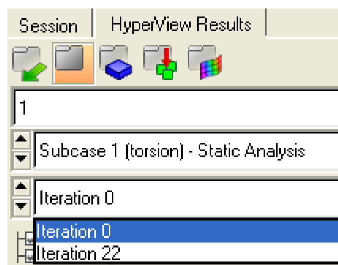


图 3-6 结果选择

（9）设为动画样式为 Linear Static 。

（10）单击按钮，开始动画演示。

（11）单击按钮，打开 Animation Controls 面板。

（12）在动画演示过程中，利用面板左侧 Max Frame Rate 下方的滚动条调整动画的播放速度。图形窗口中演示的是初始模型的变形动画。

（13）单击按钮，停止动画演示。

（14）在 File 下拉菜单中选择 Exit，退出 HyperView。

在优化过程中引入加工约束。

接下来为便于加工，增加分组模式的约束。

前面获得的外形很难加工。它提供了一个适合优化结构的样式（在本实例中，最小化已选点的位移）。

STEP 10 增加分组模式约束

（1）返回 HyperMesh，单击 return 退出 OptiStruct 面板。

（2）从 Analysis 页面进入 optimization 面板。

（3）单击进入 topography 面板。

（4）利用面板左侧的按钮，确认选中子面板 pattern grouping。

（5）单击 desvar =，从形貌设计空间列表中选择 topo。

（6）在 pattern type 处选择 linear。

（7）在 sub-type switch 处选择 basic。

（8）单击 anchor node，通过单击图形窗口上施加载荷的节点，选择节点。

HyperMesh 自动将蓝框移到 first 处，从图形窗口中选择上个节点的对角节点，如图 3-7 所示。

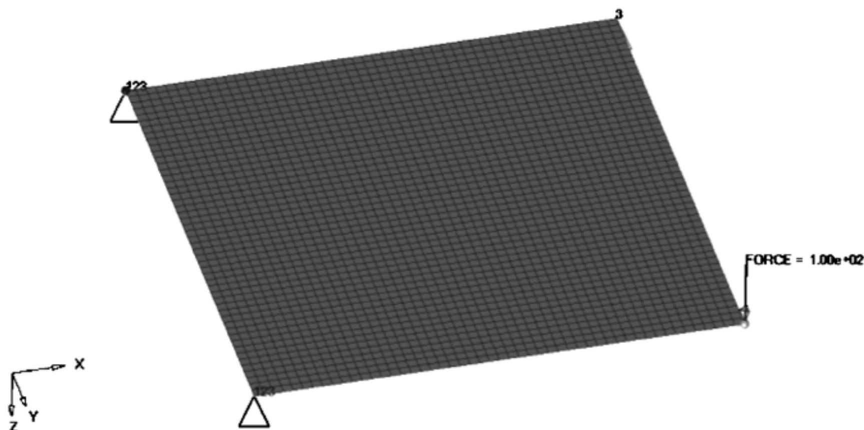


图 3-7　分组样式中定义的节点位置

（9）单击 update。

（10）单击两次 return，返回主菜单。

STEP 11 提交计算

（1）从 Analysis 页面进入 OptiStruct 面板。

（2）单击 input file 后的 save as 按钮。

（3）选择要把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 torsion_pattern.fem 。

（4）使用文件扩展名.fem 作为 OptiStruct 输入卡。

（5）单击 Save 按钮。注意到在 input file 栏出现 torsion_pattern.fem 文件的名字和位置。

（6）单击 export options 切换到 all。

（7）单击 run options 切换到 optimization。

（8）单击 memory options 切换到 memory default。

（9）单击 OptiStruct。OptiStruct 开始优化计算。如果计算成功，则 OptiStruct 模型所在的文件夹将写入新的结果文件。可以在文件 torsion_pattern.out 中检查错误信息，如果有任何错误，则该文件可帮助检查输入卡。

如前面做的那样，查看新结果。同样可以在.out 中查看首末两个迭代步中的目标值。请注意对比施加分组模式约束前后优化结果的不同。

STEP 12 查看静态的形状云图

重复前边的步骤查看形状改变云图，如图 3-8 所示。

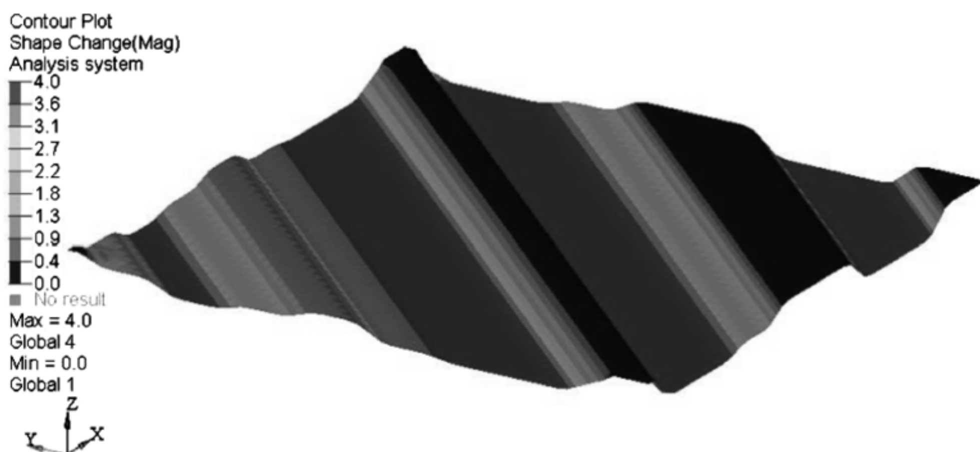


图 3-8　查看形状改变云图

3.2　实例：利用拓扑和形貌联合优化磁头悬臂

本实例介绍在 OptiStruct 中利用拓扑和形貌联合优化磁头悬臂，以达到同时提高磁头悬臂刚度和减少其重量的目的。

磁头悬臂的有限元模型如图 3-9 所示，已经创建了静力学和模态分析两种工况。本实例将重点介绍拓扑和形貌设计空间、响应、约束和目标函数的定义。综合考虑静力学和模态分析两种工况进行优化后的结构将包含加强筋，并且重量也将减少。



图 3-9　硬盘驱动的磁头悬臂

优化问题定义如下：

✓ 设计目标：加权应变能（柔度）和加权模态最小化。

✓ 设计约束：第七阶模态频率大于 12Hz。

✓ 设计变量：单元密度和节点形貌。

在本实例中包括如下操作：

✓ 利用 HyperMesh 进行联合优化的设置。

✓ 利用 HyperView 对优化结果进行后处理。

STEP 01 打开 HyperMesh，加载用户配置并打开有限元模型

（1）启动 HyperMesh，出现 User Profiles 对话框。

（2）选择 OptiStruct，并单击 OK 按钮。这样就加载了用户配置。它包括与以 Bulk Data 格式组织模型的 RADIOSS 和 OptiStruct 相对应的 HyperMesh 的功能面板、宏菜单和导入器。

（3）从工具条上的 File 下拉菜单中选择 Import。标签菜单中出现标签栏 Import。

（4）选择 Import type： FE Model。

（5）选择合适的 File type：OptiStruct。

（6）单击 Select Files 按钮，在<Hyperworks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/OptiStruct/下选择文件 combined.fem。

（7）单击 Open 按钮。

（8）单击 Import 按钮。

（9）单击 Close 按钮。

STEP 02 设置拓扑的设计空间

（1）从 Analysis 页面进入 optimization 面板。

（2）单击进入 topology 面板。

（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（4）单击 props，选择 1pin，然后单击 select。

（5）在 desvar =处输入 pin。

（6）将 type 设为 PSHELL。

（7）确保基本厚度（base thickness）为 0.0。

（8）单击 create 按钮。

（9）单击 props，只勾选 3bend，然后单击 select。

（10）在 desvar =处输入 bend。

（11）确保基本厚度（base thickness）为 0.0。

（12）单击 create 按钮。

（13）单击 return。

STEP 03 设置形貌设计空间

（1）单击进入 topography 面板。

（2）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（3）单击 props，勾选 1pin 和 3bend，然后单击 select。
（4）在 desvar=处输入 tpg。
（5）单击 create 按钮。
（6）选择 bead params 子面板。
（7）在 minimum width=处输入 0.4，在 draw angle=处输入 60，在 draw height=处输入 0.15。
（8）将 draw direction 切换到 normal to elements。
（9）将 boundary skip 切换到 load & spc。
（10）勾选 buffer zone。
（11）单击 update。
将筋设置为相对 1-plane（1 平面）对称布置，因为该情况筋布置最简单，同时能够对称。
（12）进入 pattern grouping 子面板，将 pattern type 设为 1-plane sym。
（13）单击 anchor node，输入 41，按〈Enter〉键。
（14）单击 first node，输入 53，按〈Enter〉键。
（15）单击 update。
（16）选择 bounds 子面板。
（17）设置参数为 upper bound = 1.0，lower bound = 0.0。
（18）单击 update。
（19）单击 return。

STEP 04 为优化创建响应

该问题是一个线性静态和模态的联合分析，因此我们想使得两种工况下的结构刚度最大化并提高频率，另外对第七阶模态频率进行约束。所以定义了两个响应 comb 和 freq。
（1）选择 responses 面板。
（2）在 response =处输入 freq。
（3）将 response type 设为 frequency。
（4）在 mode number 处输入 7。
（5）单击 create 按钮。
（6）在 response =处输入 comb。
（7）将 response type 设为 compliance index。
（8）单击 loadsteps，激活 force。
（9）确保用于定义归一系数的选项切换为 autonorm。
（10）输入模态阶数和相关权重，如表 3-2 所示。
（11）单击 create 按钮。
（12）单击 return。

表 3-2 模态阶数和相关权重

模态阶数	权重
1	1.0
2	2.0
3	1.0
4	1.0
5	1.0
6	1.0

STEP 05 定义约束

（1）单击 dconstraints。

（2）在 constraint =处输入 frequency。

勾选 lower bound，并在其后的文本框中输入 12。

（3）单击 response=，处输入 freq。

（4）单击 loadsteps，勾选 frequency 旁的复选框，然后单击 select。

（5）单击 create 按钮。

（6）单击 return。

STEP 06 定义目标函数

（1）单击 objective。

（2）确认将 objective 设为 min。

（3）在 response =处输入 comb。

（4）单击 create 按钮。

（5）单击 return。

STEP 07 定义优化控制卡片

（1）单击 Opti Control。

（2）勾选 MINDIM 旁的复选框，并在其后的文本框中输入 0.25。

通常情况下，推荐的最小成员尺寸可避免出现类似棋盘形状的结构。在该卡片中可定义结构中的最小尺寸。

（3）勾选 MATINIT 旁的复选框，并在其后的文本框中输入 1.0。

MATINIT 表明拓扑优化中的初始材料分数。基于以下情况，MATINIT 有几个默认值：当优化目标是质量时，默认的 MATINIT 值是 0.9；当质量作为约束时，MATINIT 的默认值重置为约束值；当质量既不作为目标函数也不作为约束时，默认值为 0.6。

（4）单击两次 return，退出面板。

STEP 08 设置模态跟踪

在优化期间，由于单元密度和其他设计的改变，模态频率和阵型也可能发生改变。为了解决该问题，定义一个参数对频率进行跟踪，使得在求解优化问题时能够跟踪感兴趣的频率。

（1）进入 control cards，单击两次 Next 按钮。

（2）找到 PARAM 并单击。

（3）在 Card Image 下方勾选 MODETRAK。

（4）在 card 面板中将 MODET_V1 设为 Yes。

（5）单击 return。注意到按钮 PARAM 变绿，表明已激活。

（6）单击 return，返回 Analysis 页面。

STEP 09 提交 OptiStruct 求解

（1）从 Analysis 页面进入 OptiStruct 面板。
（2）将 export options 设为 all。
（3）将 run options 设为 optimization。
（4）将 memory options 设为 memory default。
（5）单击 input file 后的 save as 按钮。
（6）选择要把 OptiStruct 模型文件写入的目录，并在 File name 处输入模型名 comb_complete.fem。
（7）使用文件扩展名.fem 作为 OptiStruct 输入卡。
（8）单击 Save 按钮。注意到在 input file 栏出现文件的名字和位置。
（9）单击 OptiStruct。
（10）启动 OptiStruct 进行优化分析，出现自带的独立命令解释程序（DOE 或 UNIX）。

如果优化成功，则命令解释程序中将不会出现任何错误报告。当命令解释程序中出现 Processing complete 提示时，完成优化求解。

在 HyperView 中对优化结果进行后处理。

STEP 10 后处理形状改变结果（形貌）

一旦看到在命令窗口中出现 Process completed successfully，就关闭命令窗口回到 HyperMesh。

（1）返回 HyperMesh，在 OptiStruct 面板中单击 HyperView，启动 HyperView。
（2）HyperView 用户界面窗口打开，结果自动加载。Message Log 窗口出现，提示已成功加载模型和结果到 HyperView 中。
（3）单击 Close 按钮关闭信息窗口。
（4）单击工具条上的 Deformed 按钮。
（5）通过单击每个选项处的下拉菜单，在 Result type 处选择 Shape change（v），在 Scale 处选择 Scale factor，在 Type 处选择 Uniform。
（6）保留 Value 为 1.0。
（7）在 Undeformed shape 下方，单击 Show 处的下拉菜单，并选择 None。
（8）单击 Apply 按钮，显示由于形貌优化而产生的形状改变，如图 3-10 所示。

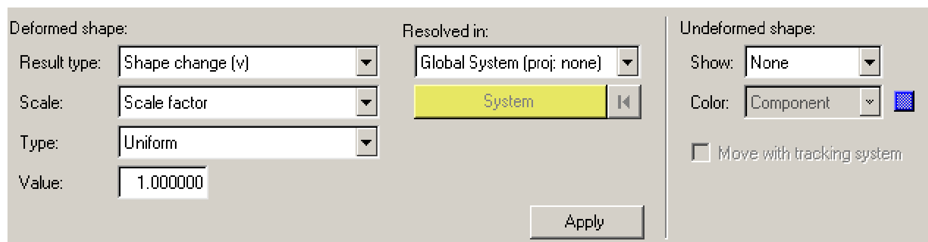


图 3-10　结果控制面板

（9）在用户界面的左侧 Result Browser 中，选择 Iteration 25，如图 3-11 所示。磁头悬臂的形貌优化结果如图 3-12 所示。

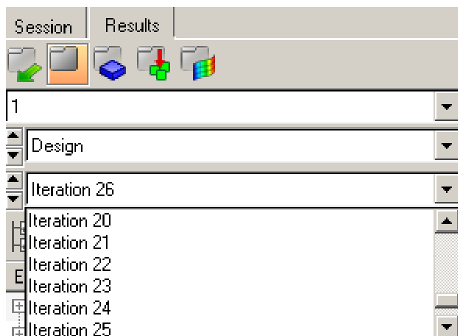


图 3-11　迭代步选择

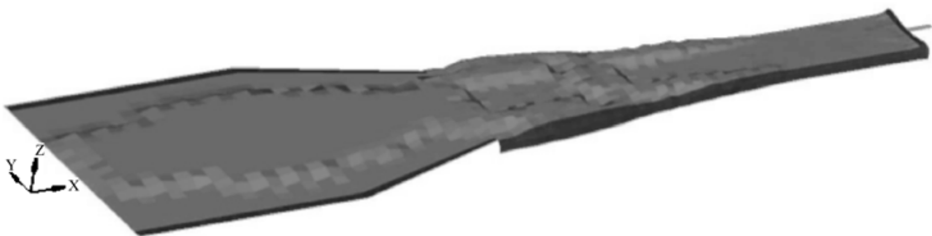


图 3-12　磁头悬臂的形貌优化结果

STEP 11 优化的材料分配云图　（拓扑）

（1）单击工具条上的 Contour 按钮。

（2）从 Result Type 下方的第一个下拉菜单中选择 Element Thickness（s），从第二个下拉菜单中选择 Thickness。

（3）从 Averaging method 下方的栏中选择 Simple。

（4）单击 Apply 按钮，显示密度云图。

STEP 12 增加优化的密度分配等值面云图　（拓扑）

（1）单击 Iso Value 按钮。

（2）从 Result Type 下方的第一个下拉菜单中选择 Element Densities（s），从第二个下拉菜单中选择 Density。

（3）在 Display options 下方，确保在 Show values 旁的栏中选择 Above。

（4）单击 Apply 按钮，显示密度的等值面图。

（5）在 Current value 处输入 0.3，然后按〈Enter〉键。

（6）在图形窗口出现等值面图。模型中密度大于 0.3 的显示在密度云图中，剩下的部分不显示，如图 3-13 所示。

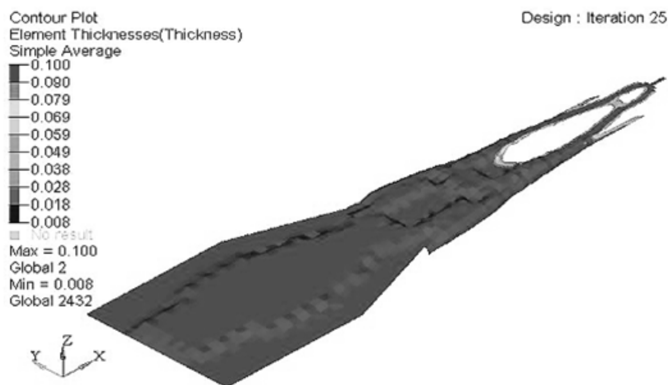


图 3-13　优化结果

3.3　实例：汽车安全带牵引器支架形貌优化

本实例将演示如何对汽车上的安全带牵引器支架进行形貌优化。安全带牵引器支架如图 3-14 所示。

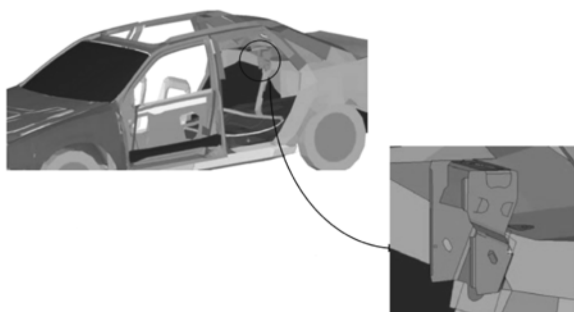


图 3-14　安全带牵引器支架

其中，支架中的载荷情况如图 3-15 所示。

本实例中，牵引器支架的优化空间如图 3-16 所示，其中设计空间由壳单元构成。

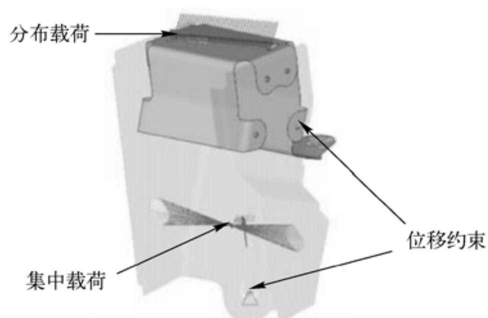


图 3-15　支架载荷

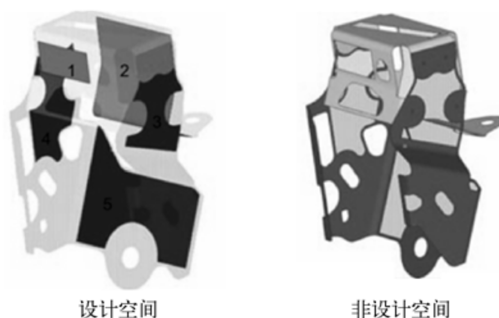


图 3-16　优化空间

本实例中包含如下操作：

✓ 创建形貌优化变量。
✓ 创建优化响应。
✓ 创建优化目标。
✓ 查看形貌优化结果。

STEP 01 运行 HyperMesh，设置用户属性并打开模型文件

（1）运行 HyperMesh，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（2）单击 OK 按钮。

（3）在工具栏中单击“导入”按钮，并在模型导入面板中单击“导入有限元模型”按钮。

（4）单击 File: 后面的文件夹图标，打开“选择文件”对话框。

（5）在相应的路径下选择 02_topography_bracket.fem 文件。

（6）单击 Import 按钮导入模型文件，如图 3-17 所示。

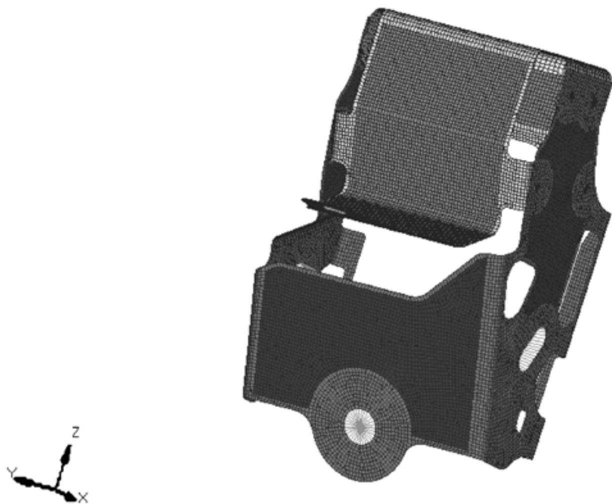


图 3-17　导入的模型文件

形貌优化设置中包含形貌优化变量的创建，优化变量的约束以及优化目标的创建等。下面的步骤将演示如何创建形貌优化中所需的卡片信息。

STEP 02 定义形貌优化设计变量

（1）进入 Analysis 页面中的 optimization 面板，单击 topography 按钮，进入形貌拓扑变量创建面板。

（2）在 desvar=后的文本框中输入 topog_01，单击 props，并勾选 design_einsatz_topography 旁的复选框，然后单击 select 按钮，如图 3-18 所示。



图 3-18　创建拓扑变量

（3）单击 create 按钮，创建针对属性 design_einsatz_topography 的形貌优化变量 topog_01。

（4）选择 bead params 面板，此时 desvar=后的文本框中有前面创建的优化变量 topog_01。在该面板下，可以设置起筋的宽度、高度、角度和起筋方向，如图 3-19 所示。

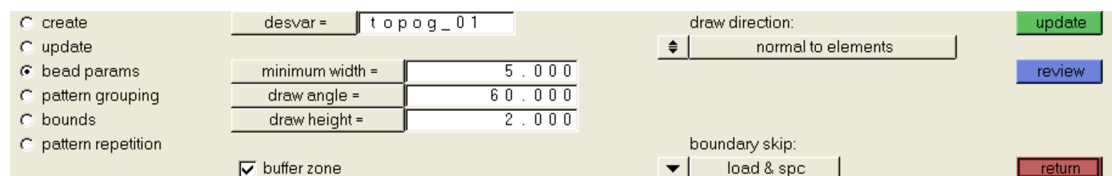


图 3-19　更新参数

（5）同时，勾选 buffer zone 旁的复选框，在 boundary skip 处选择 load&spc。

（6）单击 update 按钮。

（7）选择 bounds 面板，在 Upper Bound =与 Lower Bound= 按钮后的文本框中分别输入 0 和−1，如图 3-20 所示，约束起筋的高度为−1，即在单元法向的反方向起筋最高为 1。

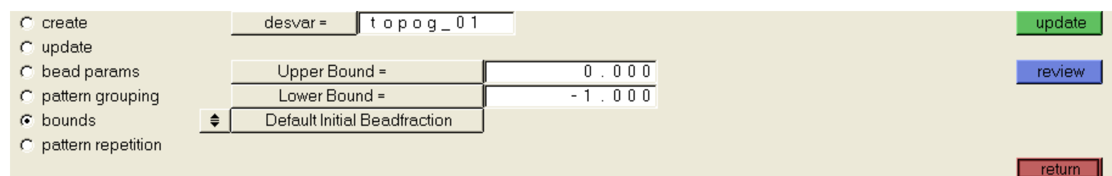


图 3-20　更新变量上下限

（8）单击 update 按钮。

（9）重复（2）～（4），创建形貌优化变量 topog_02。该形貌优化变量的设置如图 3-21 所示。



图 3-21　变量 topog_02 创建面板

选择属性，面板信息如图 3-22 所示。

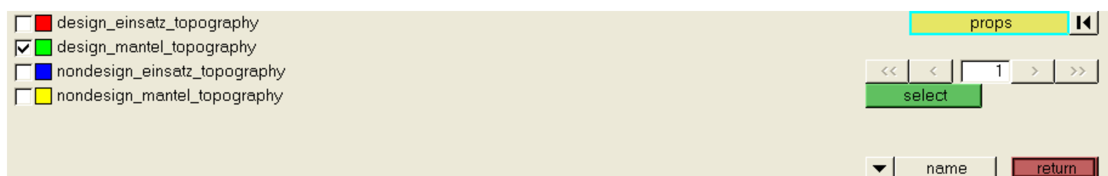


图 3-22　选择属性

更新起筋参数，面板信息如图 3-23 所示。

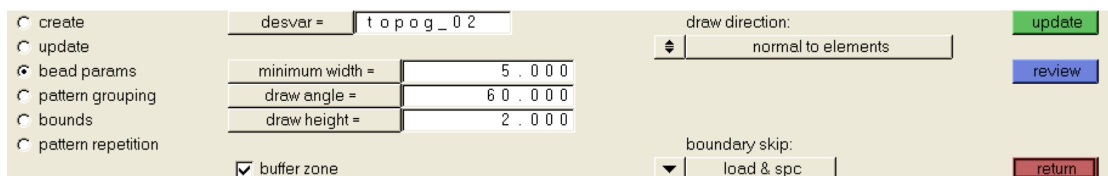


图 3-23　更新起筋参数

更新起筋约束，面板信息如图 3-24 所示。

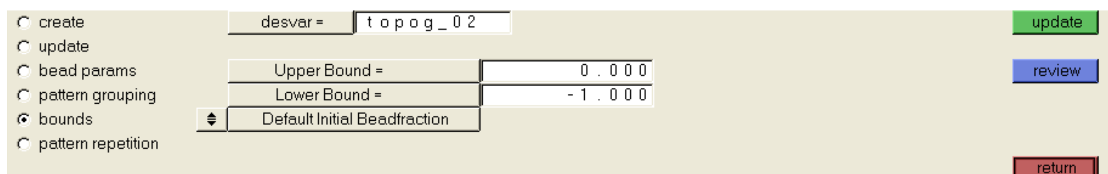


图 3-24　更新起筋约束

STEP 03　创建优化响应

（1）进入响应创建面板。

（2）单击 optimization 中的 responses，进入响应创建面板。

（3）在 response=后的文本框中输入 comp，response type 选择 compliance，并选择范围为 total，如图 3-25 所示。

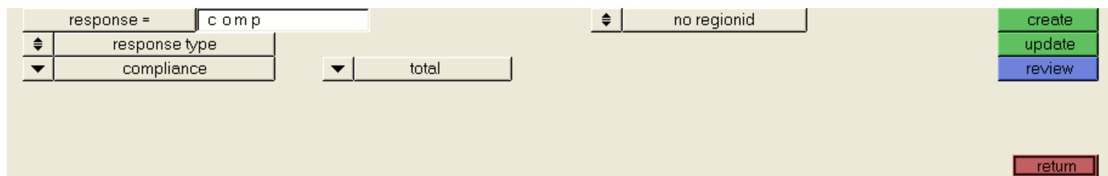


图 3-25　创建响应

（4）单击 create 按钮。

STEP 04　创建优化目标

（1）进入目标创建面板。

（2）单击 optimization 中的 objective，进入优化目标创建面板。

本实例的优化目标是结构总体应变能最小。

（3）选择目标类型为 min，单击 response = 并选择响应 comp，单击 loadstep 并选择工况：step01，如图 3-26 所示。

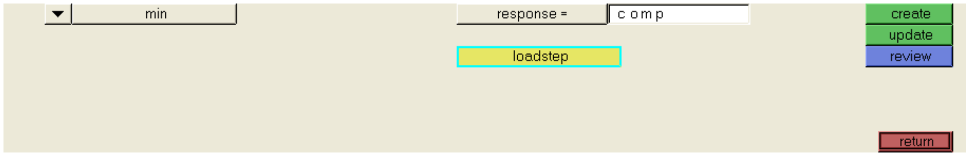


图 3-26　目标创建面板

（4）单击 create 按钮。

STEP 05 增加控制卡片

（1）进入 control cards 面板。

（2）单击 Analysis 中的 control cards，如图 3-27 所示。

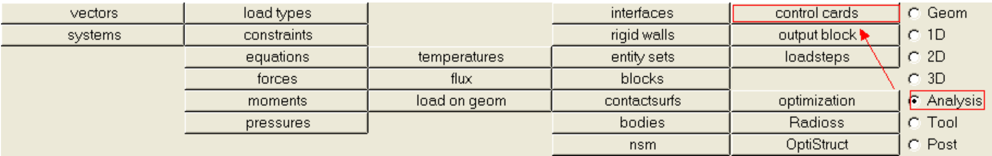


图 3-27　控制面板编辑

（3）选择 FORMAT 卡片，在 number_of_formats=后的文本框中输入 2，在上方出现的两个 FORMAT 中分别选择 HM 和 H3D，如图 3-28 所示。

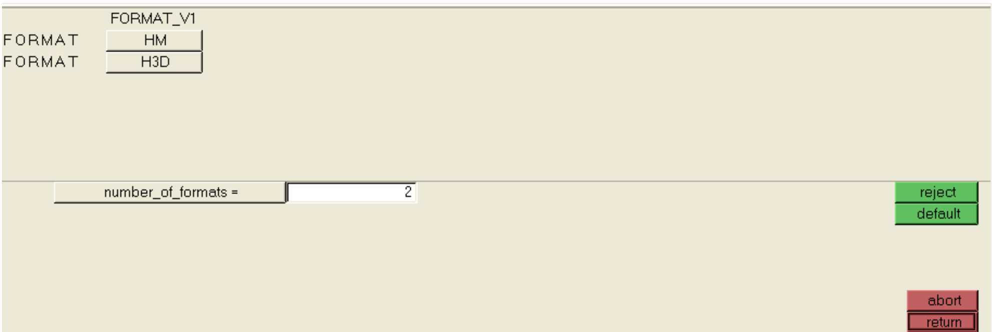


图 3-28　控制参数选择

（4）单击 return 按钮。

（5）选择 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST 卡片，勾选输出变量 STRESS，并设置 STRESS_NUM=1。

（6）在 STRSS 卡片中设置 FORM（1）为 COMPLEX，TYPE（1）为 ALL，如图 3-29 所示。

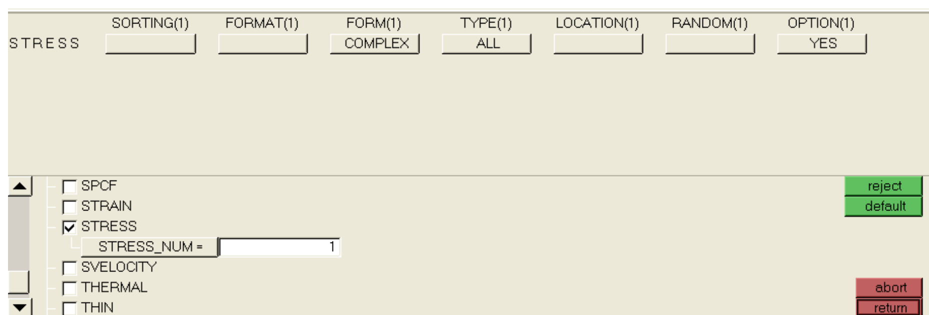


图 3-29　STRESS 卡片中的控制参数设置

（7）单击 return 按钮。

（8）选择 PARAM 卡片，并在左侧勾选 CHECKEL 旁的复选框，选择 CHECKEL_V1 类型为 NO，如图 3-30 所示。

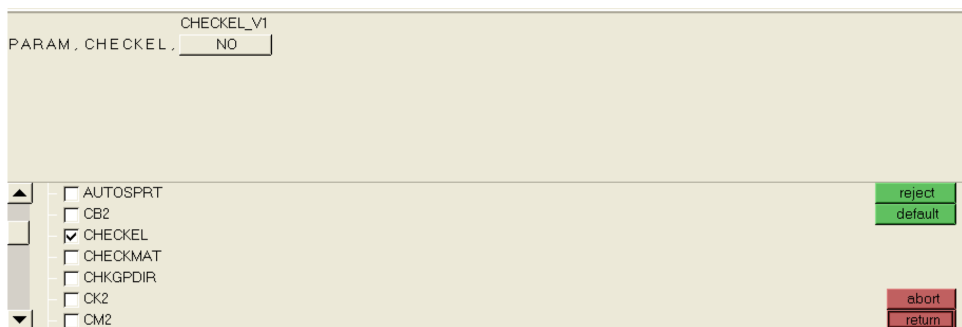


图 3-30　PARAM 卡片中的控制参数设置

（9）单击 return 按钮。

在形貌优化中，设计空间的单元的形状在优化迭代中时刻在变化，以寻求最优解。OptiStruct 迭代计算前都会检查单元的质量，为了防止优化中单元变形引起单元质量不合格而终止迭代计算，建议在形貌优化中不进行单元质量的检查。

（10）选择 RESULTS 卡片，并选择 RES_V1 类型为 ALL，如图 3-31 所示。

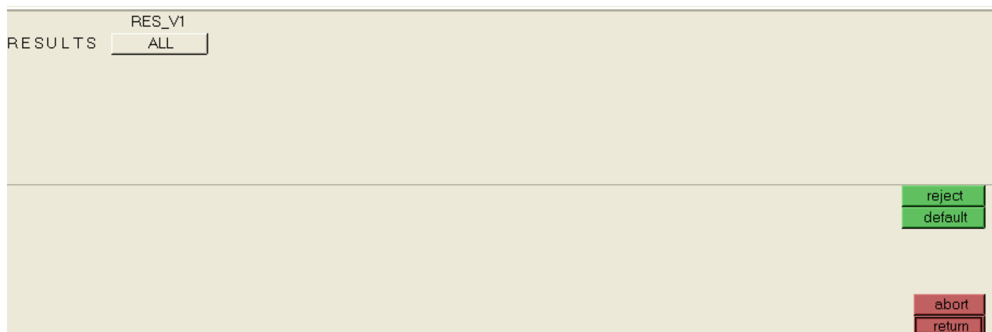


图 3-31　RESULTS 卡片中的控制参数设置

（11）单击 return 按钮。

STEP **06** 递交求解

（1）单击 Analysi 中的 OptiStruct，并单击 save as 按钮将文件另存到相应的文件夹下，并命名为 02_topography_bracket.fem，如图 3-32 所示。

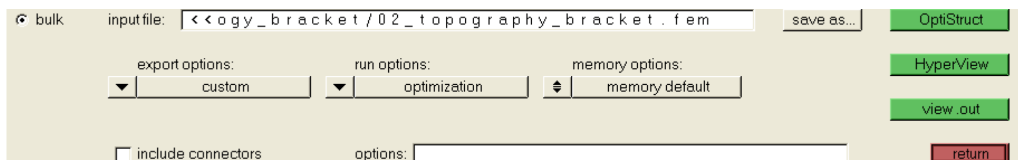


图 3-32　任务递交面板

（2）单击 OptiStruct 求解计算。

一段时间后计算结束，直接单击 HyperView 查看优化结果。

STEP **07** 查看优化结果

（1）在 OptiStruct 面板中单击 HyperView，结果文件将自动导入。

（2）在左边结果控制区域的第二栏中选择 Design，在第三栏中选择迭代步，如图 3-33 所示。一般情况下，选择最后一步，查看最后一步的最优结果。

（3）选择 Counter 按钮并单击，进行如图 3-34 所示设置，然后单击 Apply 按钮。



图 3-33　结果选择

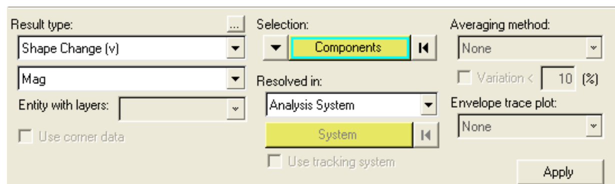


图 3-34　结果控制参数

（4）优化后的形状云图如图 3-35 所示。

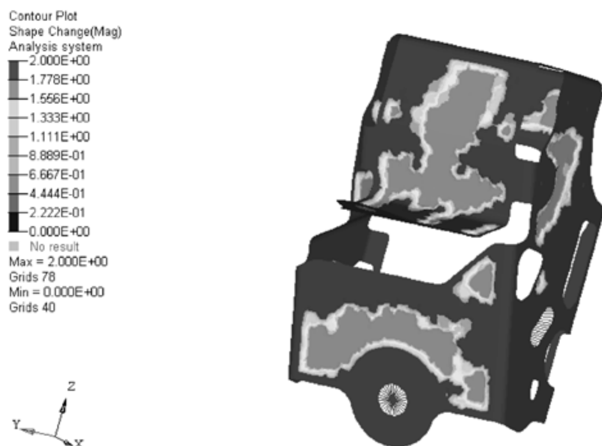


图 3-35　优化后的形状云图

STEP **08** 应用优化后的形状结果

在 HM 中，可以将优化后的形貌应用到现有的模型上，以方便结构的设计。下面将介绍如何应用优化后的结果。

（1）进入 post 面板，并单击 apply result 按钮，进入 Apply Result 面板，在 simulation=中选择优化迭代的最后一步，在 data type =中选择 Shap Change，选择结果为 displacements，如图 3-36 所示。

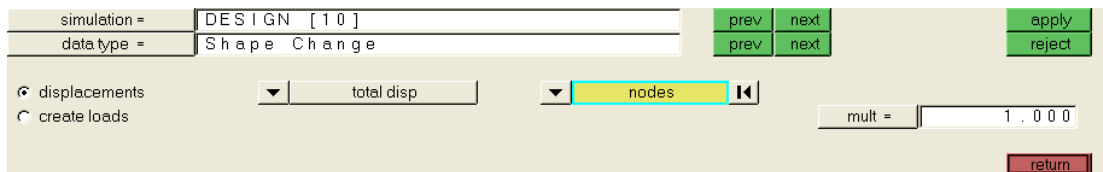


图 3-36　后处理面板设置

（2）单击 nodes 并选择 displayed，在 mult=后的文本框中输入 1。

（3）单击 Apply 按钮，形状已经应用到原来的模型中，如图 3-37 所示。

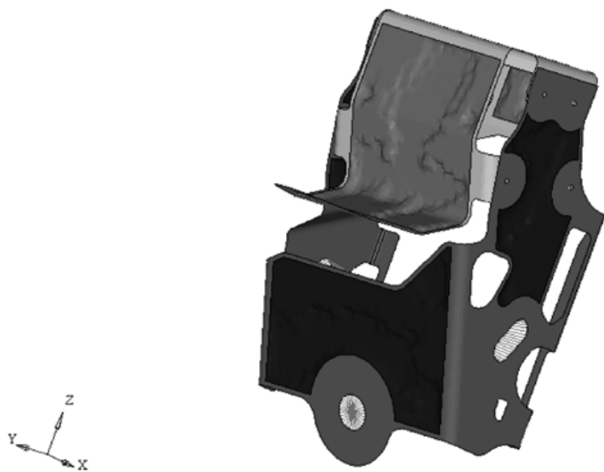


图 3-37　重新得到的有限元模型

可以将应用形貌以后的计算结果保存，用于后续更优性能的结构的设计分析。

3.4　形貌优化卡片简介

请先做完实例或者熟悉形状优化技术，然后查看卡片了解更多内容。

卡片 DTPG 定义形貌优化设计变量定义参数，如表 3-3 所示。

表 3-3　形貌优化变量卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DTPG	ID	TYPE	PID1/DVID	PID2	PID3	PID4	PID5	PID6	
		PID7	…	…	…	…	…	…	
	MW	ANG	BF	HGT	Norm/XD	YD	ZD	SKIP	
	PATRN	TYP	AID/XA	YA	ZA	FID/XF	YF	ZF	
	PATRN2	UCYC	SID/XS	YS	ZS				
	BOUNDS	LB	UB	INIT					

表 3-4 所示卡片用于定义模式重复约束中控制部分的可选扩展项。

表 3-4　模式重复卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	MASTER								
	COORD	CID	CAID/XCA	YCA	ZCA	CFID/XCF	YCF	ZCF	
			CSID/XCS	YCS	ZCS	CTID/XCT	YCT	ZCT	

表 3-5 所示卡片用于定义模式重复约束中受控部分的可选扩展项。

表 3-5　模式重复参数

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	SLAVE	DTPL_ID	SX	SY	SZ				
	COORD	CID	CAID/XCA	YCA	ZCA	CFID/XCF	YCF	ZCF	
			CSID/XCS	YCS	ZCS	CTID/XCT	YCT	ZCT	

1. 示例 1

本实例定义的形貌设计变量表明允许在对应 PSHELL 属性编号 1、9 和 23 的组件中创建加强筋。加强筋最小宽度为 3 个单位，起筋角为 60°，最大高度为 5 个单位。起筋方向沿着单元法向，但可能在正方向或负方向形成筋。加强筋需要分组形成过点（0，25，0）沿 z 轴的 120 个间隔的周期模式，同样相对 xy 平面对称，如表 3-6 所示。

表 3-6　示例 1 卡片定义

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DTPG	1	PSHELL	1	9	23				
	3.0	60.0	Yes	5.0	Norm			both	
	PATRN	50	0.0	25.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
	PATRN2	3	1.0	0.0	0.0				
	BOUNDS	-1.0	1.0						

2. 示例 2

本实例参考 DVGRID 编号为 1 的形状变量定义形貌设计变量。加强筋最小宽度为 5 个单位，起筋角为 75°，最大高度为 5 个单位。加强筋的高度和起筋方向已在卡片

DVGRID 中定义。同时根据卡片 DVGRID 中的定义，确保加强筋只沿着正方向生成，如表 3-7 所示。

表 3-7　示例 2 卡片定义

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DTPG	1	DVGRID	1						
	5.0	75.0	YES						
	BOUNDS	0.0	1.0						

DTPG 卡片关键字的解释如表 3-8 所示。

表 3-8　卡片参数意义

关　键　字	注　　释
ID	每个 DTPG 卡片必须有一个单独的编号 没有默认值（大于 0 的整数）
TYPE	表明是否为 PSHELL、PCOMP 或 DVGRID 定义 DTPG 卡片 没有默认值（PSHELL、PCOMP 或 DVGRID）
PID/DVID	如果 TYPE 是 PSHELL 或 PCOMP，则这个对象是属性编号；如果它适用于模型中 PTYPE 类型中的所有属性，使用 ALL。可能需要给出很多 PIDs 如果 TYPE 是 DVGRID，则这个对象是对应一系列 DVGRIDs 的设计变量号；只可能给一个 DVID 默认为 ALL （大于 0 的整数，空或 ALL）
MW	肋的最小宽度。这个参数控制了模型中肋的宽度（推荐值为平均单元宽度的 1.5～2.5 倍）。查看 comment 1 没有默认值（大于 0 的实数）
ANG	以度数为单位的起筋角。这个参数控制了肋边界处的角度（推荐值为 60°～75°）。查看 comment 1 没有默认值（大于 1，小于 89 的实数）
BF	缓冲区。该参数在设计区中单元和设计区外单元之间创建一个缓冲区。查看 comment 2 默认为 YES （YES 或 NO）
HGT	起筋高度。该参数设定加强筋的最大高度。只有当 TYPE 为 PSHELL 或 PCOMP 时，该参数有效 没有默认值（大于 0 的实数）
norm/XD,YD,ZD	起筋方向。如果 norm/XD 项是 norm，将在单元法向创建形状变量。如果所有项是实数，将在由 3 项定义的 *x*、*y*、*z* 向量指定的方向创建形状变量。其中 *x*，*y* 和 *z* 的值是在全局坐标系中定义的。只有当 TYPE 是 PSHELL 或 PCOMP 时，该项参数有效 默认为 NORM （norm/XD 栏中的 NORM 或全部 3 栏中的实数）
SKIP	边界遗漏。该参数从 OptiStruct 求解器中将某些节点移出设计区域。如果是 none，属于指定的属性编号单元中的全部节点将作为设计变量的部分。如果是 bc 或 spc，施加 SPC 或 SPC1 的任何节点都将从设计区域中移除。如果是 load，则施加 FORCE、FORCE1、MOMENT、MOMENT1 或 SPCD 的节点都将从设计区域中移除。如果是 both，则施加 spc 或 load 的节点都将从设计区域中移除。只有当 TYPE 是 PSHELL 或 PCOMP 时，该项才有效 默认为 BOTH （BOTH、BC、SPC、LOAD 或 NONE）
PATRN	标记 PATRN 表明激活了变量模式组及模式组需要遵循的信息
TYP	变量模式重复的类型。如果有任何对称或变量模式重复，则需要定义该参数。如果是 0 或空，将忽略固定点、第一向量和第二向量。如果小于 20，则将忽略第二向量。查看 comment 4 默认为 0（不小于 0 的整数）
AID/XA,YA,ZA	参数模式组的固定点。该项定义了一个决定节点如何分组到变量的点。查看 comment 3。*X*、*Y* 和 *Z* 值位于全局坐标系中。可以在 AID/XA 栏中输入一个节点编号定义固定点 默认为 origin （在 3 项为实数或在 AID/XA 栏中为整数）
FID/XF,YF,ZF	用于参数模式组的第一向量方向。这些栏中定义了一个 *xyz* 向量，用于决定节点如何分组到变量（查看 comment 3）。*x*，*y* 和 *z* 值位于全局坐标系中。可以在 FID/XF 栏中输入一个节点编号定义第一向量。 该向量从固定点指向该节点。如果所有栏为空而且 TYP 栏非空或为 0，则 OptiStruct 报错 没有默认值

（续）

Field	Contents
PATRN2	标记 PATRN 表明变量模式组的扩展卡。只有在定义模式组需要第二向量时，才需使用该卡片
UCYC	周期对称中周期重复的数目。该项定义了周期对称中放射楔形的数目。每个楔形的角度是 360.0 / UCYC。查看 comment 4 默认为 0 （大于 0 的整数或空）
SID/XS,YS,ZS	用于决定参数模式组中第二个向量的方向。这些栏中定义了一个 *x*、*y*、*z* 向量，联合第二个向量形成一个平面。第二向量位于该平面内，并且垂直于第一向量。有时需要第二向量决定如何将节点分组到参数中（查看 comment 3）。*x*，*y* 和 *z* 值位于全局坐标系中。可以在 SID/XS 栏中输入一个节点编号定义第二向量。 该向量从固定点指向该节点。如果所有栏为空而且 TYP 栏有不小于 20 的值，则 OptiStruct 报错 没有默认值
BOUNDS	标记 BOUNDS 表明需遵循的关于上限和下限及节点移动初始值的信息
LB	用于控制节点移动的下限。该项设定的节点移动下限等同于 LB*HGT 默认为 0.0 （小于 UB 的实数）
UB	用于控制节点移动的上限。该项设定的节点移动上限等同于 UB*HGT 默认为 1.0 （大于 LB 的实数）
INIT	用于控制节点移动的初始值。 该项设定的节点移动初始值等同于 INIT*HGT 如果 LB > 0.0 且 UB > 0.0，则默认值= LB + factor*（UB−LB） 如果 LB < 0.0 且 UB < 0.0，则默认值= UB − factor*（UB−LB） 如果 LB < 0.0 且 UB > 0.0，则默认值= factor*max（abs（LB）,UB） where: 如果在响应 BEADFRAC 中不使用 DTPG 或使用 DTPG 的响应，即不作为目标也不作为约束，则 factor = 0.0 如果在作为目标的响应 BEADFRAC 中使用 DTPG，则 factor = 0.9 如果在作为约束的响应 BEADFRAC 中使用 DTPG，则 factor = constraint_value （LB <实数< UB）
MASTER	标记 MASTER 表明该设计变量作为模式重复中的主控部分
COORD	标记 COORD 表明需要遵循的用于模式重复坐标系的信息。如果出现标记 MASTER 或 SLAVE，则将需要该标记
CID	可能用于模式重复坐标系的直角坐标系编码。查看 comment 6 默认为 0 （大于 0 的整数）
CAID/XCA, YCA, ZCA	用于模式重复坐标系的固定点。该点可以通过在 CAID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCA、YCA 和 ZCA 中输入 *X*、*Y* 和 *Z* 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 6 没有默认值（在 3 项为实数或在第一项为整数）
CFID/XCF, YCF, ZCF	用于模式重复坐标系的第一点。该点可以通过在 CFID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCF、YCF 和 ZCF 中输入 *X*、*Y* 和 *Z* 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 6 没有默认值（在 3 项为实数或在第一项为整数）
CSID/XCS, YCS, ZCS	用于模式重复坐标系的第二点。该点可以通过在 CSID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCS、YCS 和 ZCS 中输入 *X*、*Y* 和 *Z* 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 6 没有默认值（在 3 项为实数或在第一项为整数）
CTID/XCT, YCT, ZCT	用于模式重复坐标系的第三点。该点可以通过在 CTID 栏中输入一个节点号定义或者在 XCT、YCT 和 ZCT 中输入 *X*、*Y* 和 *Z* 的坐标值（基于全局坐标系）来定义。查看 comment 6 没有默认值（在 3 项为实数或在第一项为整数）
SLAVE	标记 SLAVE 表明该设计变量从属于定义的主模式，DTPL_ID 对象将其作为参考。查看 comment 6
DTPL_ID	用于主模式定义的 DTPL 编号 没有默认值（大于 0 的整数）
SX, SY, SZ	用于模式重复在 *X*、*Y* 和 *Z* 方向上各自的缩放系数。查看 comment 6 默认为 1.0 （大于 0 的实数）

DTPG 卡片关键字的更多解释如下：

（1）利用加强肋的最小宽度和拔模角决定形状变量的几何。图 3-38 显示了一个单向垂

直于可设计单元平面的形状变量的横截面。肋的顶部是平的，该平面横跨直径为最小肋宽度参数的圆。肋边减少的角度等同于起筋角参数。

（2）缓冲区是用于控制如何处理设计区与非设计区之间交界面的参数。如果激活，则 OptiStruct 将形状变量放置在离非设计单元足够远的位置，从而保证合适的肋宽和起肋角。如果非激活，在肋和非设计单元之间的边界将有个突然的过渡。在由于边界遗漏参数而忽视的任何节点 （field 10）周围都会有一个缓冲区。在设计区与非设计区单元之间是否有缓冲区的过渡处的对比如图 3-39 所示。

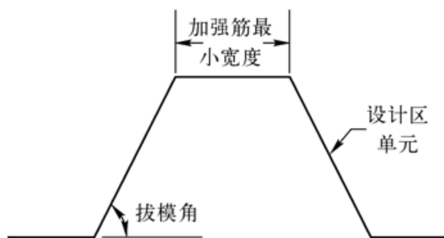


图 3-38　肋宽度和起肋角的定义

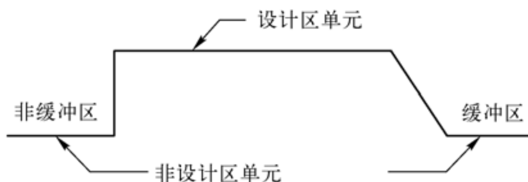


图 3-39　在设计区与非设计区单元之间是否有缓冲区的过渡处的对比

（3）可强迫施加关于一个、两个或三个平面对称的形貌优化。推荐为对称的模型和载荷情况定义中间平面，因为如果不强迫，则自动生成的变量可能不对称。对称的网格不是必须的，OptiStruct 将会产生关于中间平面接近相同的变量。如果中间平面两个边的网格大小不同，则 OptiStruct 将把中间平面的正向创建的变量映射到另外一边，但不在中间平面的负向创建变量，不会与正向重叠在一起。中间平面的正向就是第一向量和第二向量的向量积指向的。

（4）可在卡片 DTPG 中定义变量模式组。OptiStruct 将基于从 field 20 中选出的模式类型生成形状变量。对于 1～14 的变量模式组类型，只需定义第一向量和固定点。对于 20 及以上的变量模式组类型，只需定义固定点、第一向量和第二向量。如果需用一节点定义第一向量，则法向向量将开始在固定点，朝向给定节点（查看下面），如图 3-40 所示。对于第一向量，第二向量或固定点可能需要节点或 *x*、*y*、*z* 数据，也可能是混合的（就是说可能通过节点确定固定点，通过 *x*、*y*、*z* 数据确定第一向量，反之亦然）。

在 OptiStruct 中，对于形貌优化非常有用的特征是在简单模式中自动生成形状变量。在很多情况下，由于加工约束或避免在形状优化时单元崩溃的风险，需要在符合需求形状的模式中创建形状变量。 在基础形貌优化（TYP = 0）中，OptiStruct 创建圆形的形状变量 。OptiStruct 包含不同的形状变量模式库，可从 DTPG 卡片中的 TYP 参数处获得。

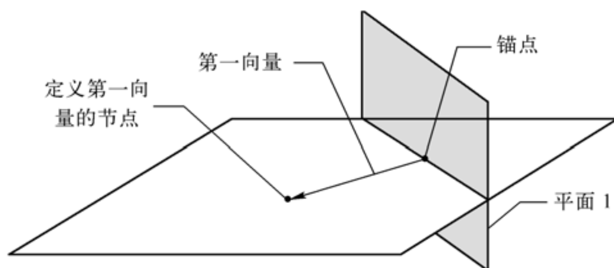


图 3-40 利用节点定义第一向量

通过捕捉节点或在栏 22、23 和 24 定义的向量，使其投影到平面 1，确定出第二向量。如果使用节点定义第二向量，则第二向量从固定点指向投影节点。如果使用向量定义第二向量，则投影向量的基点位于固定点。第二向量是平面 2 的法向，如图 3-41 所示。

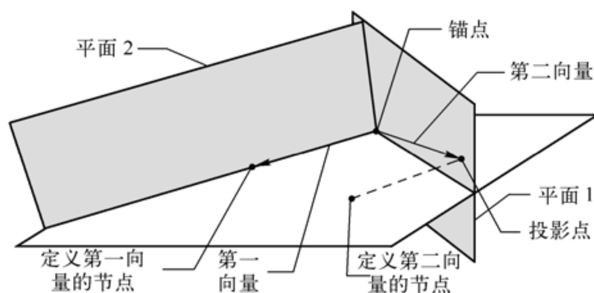


图 3-41 平面 2 定义

平面 3 由平面 1 和平面 2 的法向共同决定，如图 3-42 所示。.

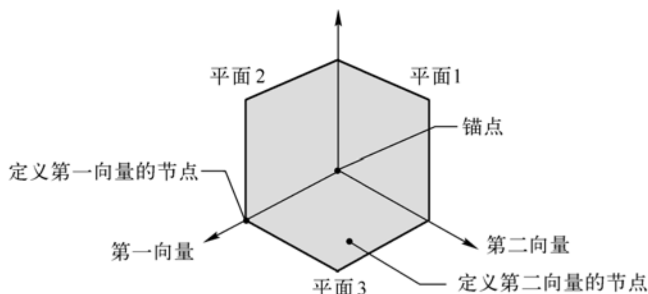


图 3-42 平面 3 定义

（5）对于 OptiStruct 支持的模式列表，请查看 Pattern Grouping Options。

（6）模式重复允许关联设计域中的相似区域，使得产生相似的拓扑分布。通过定义 Master 和 Slave 区域来实现。一个 DTPL 卡片应该只包含一个 MASTER 标记或 SLAVE 标记。在包含 SLAVE 标记的任何 DTPL 卡片中不能导出加强肋参数。对于 Master 和 Slave 区域，都需要定义由标记 COORD 描述的模式重复坐标系。为使用对称，坐标系可能是左手定则或右手定则的笛卡儿坐标系。坐标系可以通过下面列出的按照优先顺序排列的两种方法来定义。

➢ 定义 4 点，利用下面这些点来定义坐标系（它是定义左手定则坐标系的位移方法）。
  ✓ 从固定点指向第一点的向量定义为 x 轴。
  ✓ 第二点位于 xy 平面，表明了 y 轴正向。
  ✓ 第三点定义 z 轴正向。
➢ 定义直角坐标系和一个固定点。如果只定义了一个固定点，则假定使用全局坐标系。

多个 Slave 可参照相同的 Master。

可为 Slave 区域定义缩放系数，允许调整 Master 的布局。

对于更多的细节描述，请参考包含 User's Guide 中 Manufacturability for Topography Optimization 部分的 Pattern Repetition 页。

3.5 autobead 模块简介

autobead 是专门用于对形貌优化结果进行快速后处理的模块，集成在 OSSmooth 中。autobead 可以根据工艺可行性，通过设定加强筋层数（Layers/Level）来生成不同的结果，如图 3-43 所示。一般来讲，层数越多则性能越好，但工艺越复杂。

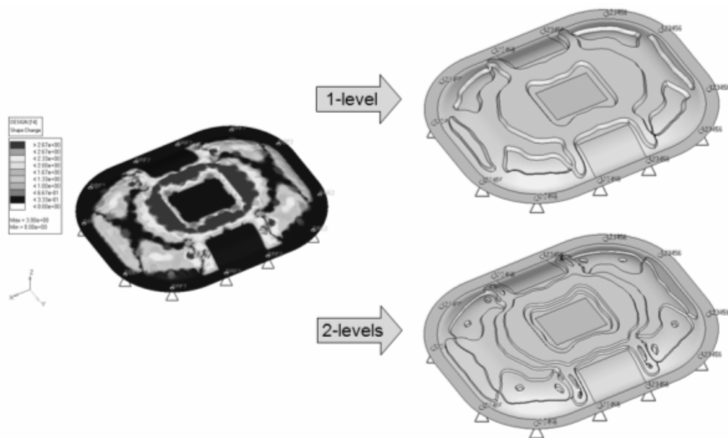


图 3-43 将形貌优化结果解释成不同层数的加强筋

3.6 小结

形貌优化可广泛应用于各个行业，如汽车上钢板冲压而成的结构件和覆盖件，发动机的各种壳体和盖板，电子行业的仪器盒，几乎所有的冲压成形件都可以采用形貌优化技术来提高刚度等性能。

形貌优化结果重新解释成一个新设计非常关键，需要考虑材料的冲压性能等。因此，除了利用 autobead 快速生成新设计有限元模型以校核力学性能外，还需通过冲压成形仿真技术（如 HyperForm 等），检查实际零件的冲压成形可行性。

第 4 章

尺寸优化技术实例



尺寸优化是最经典的优化技术，一般也叫参数优化技术（改变模型参数值，网格模型保持不变），可以对有限元模型的各种参数，如板件厚度、杆梁截面尺寸、材料特性、弹性元件刚度等进行优化。根据设计阶段的不同，可分为以下两种类型：

- 用于详细设计的尺寸优化技术。此时，产品或者零部件的结构形式已经确定，只需确定一些规格尺寸和参数即可。在实际工程应用中，经常会采用离散变量进行优化。此外，工程上经常采用经验或者解析的方法来确定零部件尺寸和参数，可以把这些工程算法通过数学表达式，或者外部函数集成到 OptiStruct 优化问题中，从而考虑更多的设计约束。
- 用于概念设计的自由尺寸优化。这种技术用于确定非等厚薄板零件（用板壳单元进行模拟）的厚度分布，如航空航天结构用得比较多的机加件和化铣件。在自由尺寸优化中，设计空间每个单元（一个零部件可能包含成千上万个单元）的厚度就是一个设计变量，其优化算法同拓扑优化（每个单元的单元密度就是一个变量）类似。自由尺寸优化技术也可用于复合材料铺层裁剪设计，详见本书第 6 章。

本章通过 4 个实例演示尺寸优化技术的应用操作过程，并通过对尺寸优化相关卡片的解释帮助读者深入了解尺寸优化技术方法。

本章重点知识

4.1　实例：支架的尺寸优化
4.2　实例：碎纸机的尺寸优化
4.3　实例：飞机翼肋的自由尺寸优化
4.4　实例：集成外部函数的尺寸优化
4.5　尺寸优化卡片
4.6　小结

4.1　实例：支架的尺寸优化

本实例展示了如何在壳单元的焊接支架上进行尺寸优化以及通过定义离散设计变量，进行尺寸优化。图 4-1 所示的是带有载荷和约束的结构模型文件。优化的目标是在指定某一应力约束条件下达到使用材料最少。支架的厚度变化是相互关联的，即在达到最优化设计时，支架两侧的构件的厚度满足一定的数学关系。

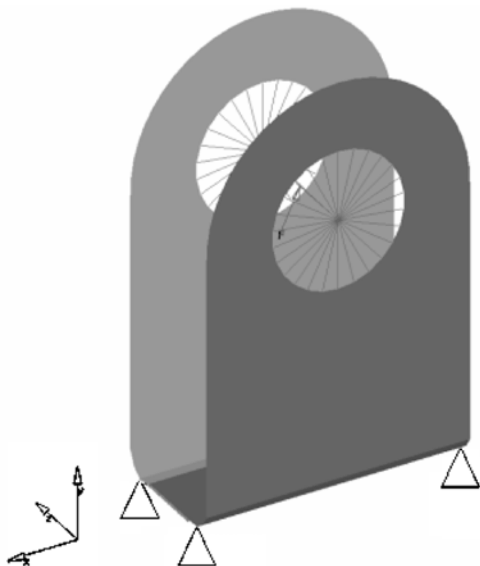


图 4-1　焊接支架的结构模型

模型文件中，约束条件、载荷、材料属性和载荷工况（载荷步）已经定义。

优化问题如下。

- ✓ 设计目标：体积最小化。
- ✓ 设计约束：支架上最大 Von Mises 应力低于 100MPa。
- ✓ 设计变量：支架厚度。

下面的练习内容如下：

- ✓ 在 HyperMesh 中定义尺寸优化问题。
- ✓ 求解尺寸优化问题。
- ✓ 定义离散设计变量在此进行优化求解。
- ✓ 查看结果。

STEP 01　启动 HypeMeshDesktop，设置 User Profile，打开文件

（1）启动 HyperMesh Desktop。

（2）在 User Profile 对话框中选择 OptiStruct 并单击 OK 按钮。

（3）这样就加载了用户配置。它包括与以 Bulk 数据格式组织模型的 RADIOSS 和 OptiStruct 相对应的 HyperMesh 的功能的面板、宏菜单和导入器。

（4）User Profiles…也可以通过工具栏的 Preferences 下拉菜单进入。

（5）单击 Open Model 按钮。

（6）选择 bracket_size.hm 文件，文件位于 HyperWorks 安装路径下的/tutorials/hwsolvers/optistruct/文件夹，并单击 Open 按钮。

（7）bracket_size.hm 数据文件在当前 HyperMesh 中载入。

STEP 02 定义设计变量

（1）在 Analysis 页面下，选择 optimization 面板。

（2）选择 size 面板。

（3）使用面板左侧的单选框选择 desvar 子面板。

（4）单击 desvar =并输入 part1。

（5）单击 initial value =并输入 2.5。

（6）单击 lower bound =并输入 1.0。

（7）单击 upper bound =并输入 2.5。

（8）将该变量的设置选项切换为 move limit default。

（9）单击 create 按钮。

（10）一个名为 part1 的设计变量已经创建。该设计变量初始值为 2.5，下限值为 1.0，上限值为 2.5。

（11）重复（4）～（9）步创建 part2，使用相同的初始值和上下限。

（12）使用面板左侧的单选框选择 generic relationship 子面板。

（13）单击 name =并输入 part1_th。

（14）单击 entity selection 切换到 prop。

（15）单击 prop 从 component 列表中选择 part1。

（16）从 comp 按钮下自动弹出一个属性选择按钮。

（17）单击属性选择按钮，从弹出的菜单中选择 Thickness T。

（18）单击 designvars 按钮。

（19）设计变量列表出现。

（20）从弹出的设计变量列表中，激活 part1。

（21）该处线性系数（part1 后面文本框中的数值）已被自动设置为 1.000。

（22）单击 return 按钮。

（23）单击 create 按钮。

（24）即创建设计变量与属性的关联 part_th，它将设计变量 part1 与名为 part1 的部件的 PSHELL 卡片厚度属性关联。

（25）重复（12）～（19）步，创建 part2_th，将设计变量 part2 与 part2 的 PSHELL 卡片厚度属性关联起来。

（26）单击 return 按钮返回 Optimization Setup 面板。

STEP 03 设计变量关联

（1）选择 desvar link 面板。
（2）单击 dlink =并输入 link1。
（3）单击 dependent 下的 designvar=，选择 part2。
（4）单击 independent 下的 designvars，激活 part1。
（5）该处线性系数（part1 旁边文本框中的系数） 自动设置为 1.000。
（6）单击 return 按钮。
（7）设置 C0 =0.000，CMULT =1.000。
（8）单击 create 按钮。
（9）此时设计变量 part2 与设置变量“part1”成线性关系。
（10）单击 return 按钮返回 Optimization Setup 面板。

STEP 04 定义响应

详细描述可以在 OptiStruct 用户手册 Responses 板块下找到。
（1）选择 responses 面板。
（2）单击 response =并输入 volume。
（3）单击 response type 切换开关并从弹出的快捷菜单中选择 volume。
（4）确认类型选择为 total。
（5）单击 create 按钮。一个关于整个模型的 volume 体积响应已定义。
（6）单击 response =并输入 stress1。
（7）单击 response type，从下拉菜单中选择 static stress。
（8）单击 props 按钮，选择 part1。
（9）单击 select 按钮。将出现一个应力类型选择按钮。
（10）单击“应力选择”按钮，并在弹出的快捷菜单中选择 von mises。
（11）单击 von mises 下的选择按钮并从下拉菜单中选择 both surfaces。
（12）单击 create 按钮。一个关于 part1 的单元响应 stress1 已定义。
（13）单击 response =并输入 stress2。
（14）单击 props 按钮。
（15）单击屏幕上任意一个粉红色壳单元，并选择 part2 这个部件。
（16）单击 select 按钮。
（17）单击 create 按钮。一个关于 part2 的单元响应 stress2 已定义。
（18）单击 return 按钮返回 Optimization Setup 面板。

STEP 05 定义目标函数

在本例中，目标函数是最小化之前定义的体积响应。

（1）选择 objective 面板。
（2）单击面板左上角的切换开关，并从下拉菜单中选择 min。
（3）单击 response =并从响应列表中选择 volume。
（4）单击 create 按钮。
（5）目标函数定义完成。
（6）单击 return 按钮返回 Optimization Setup 面板。

STEP 06 定义约束

被定义为目标函数的响应不能再被定义为约束，在此模型中，不约束体积响应。约束 stress1 和 stress2 响应的上限值。

（1）选择 dconstraints 面板。
（2）单击 constraint =并输入 stress1。
（3）单击 response =并从响应列表中选择 stress1。面板中将会出现 loadsteps 按钮。
（4）单击 loadsteps 按钮。
（5）激活 STEP 并单击 select 按钮。
（6）激活 upper bound =。
（7）单击 upper bound =并输入 100。
（8）单击 create 按钮。一个关于 stress1 响应的约束已定义。该响应具有上限值 100，并与 STEP 工况相连。
（9）单击 constraint =并输入 stress2。
（10）单击 response =并从响应列表中选择 stress2。
（11）单击 loadsteps 按钮。
（12）激活 STEP 并单击 select 按钮。
（13）激活 upper bound =。
（14）单击 upper bound =并输入 100。
（15）单击 create 按钮。一个关于 stress1 响应的约束已定义。该响应具有上限值 100，并与 STEP 工况相连。
（16）单击 return 按钮两次返回主菜单。

STEP 07 存储 HyperMesh 数据

（1）在 File 下拉菜单中，选择 Save As 命令。
（2）弹出 Save file 对话框。
（3）选择想要保存数据的路径，并输入文件名 bracket_size.hm，单击 Save 按钮。

STEP 08 启动 OptiStruct

（1）在 Analysis 页面下选择 OptiStruct 面板。

（2）在 input file 域后单击 save as 按钮。

（3）弹出 Save file 对话框。

（4）在 File name 域选择想要保存 OptiStruct 文件的路径，并输入文件名 bracket_size.fem。

（5）以.fem 作为扩展名的文件是 OptiStruct 的运算输入文件。

（6）单击 Save 按钮。

（7）注意到 bracket_size.fem 文件的文件名和路径在域 input file 中显示。

（8）设置 memory options 为 memory default。

（9）单击 run options 并选择 optimization。

（10）设置 export options 为 all。

（11）单击 OptiStruct 按钮。

OptiStruct 优化计算开始。如果计算成功，将在 OptiStruct 模型所在目录的中看到新的结果文件。如果计算出错，则 bracket_size.out 文件可以有效地帮助查看错误信息并调试输入文件。

在结果文件所在的目录中自动生成表 4-1 中的文件。

表 4-1　计算后结果文件列表

文件名称	说　明
bracket_size.hgdata	HyperGraph 文件，包含目标函数、约束冲突百分比和每次迭代约束数据
bracket_size.his_dat	OptiStruct 迭代历史文件，包括目标函数迭代历史记录以及约束错误记录。可以用来绘制迭代历史曲线
bracket_size.html	优化过程的 HTML 报告，给出了优化问题方程的概要以及最终迭代结果
bracket_size.out	OptiStruct 输出文件，包括文件组织的具体信息，优化问题的组织信息，估计运行所需要的 RAM 和磁盘空间，每次优化迭代信息，计算时间信息。该文件包括了每次迭代的柔顺性、体积计算信息和厚度信息。通过该文件，可以很清楚地查看警告和错误信息
bracket_size. prop	OptiStruct 属性输出文件，包括所有尺寸优化最后一步迭代的属性数据
bracket_size.h3d	HyperView 二进制结果文件
bracket_size.sh	形状结果文件。包括在分析中每个单元的材料密度、无效单元材料密度、无效单元尺寸参数等。.sh 文件可以用来重启计算，如果有必要，则运行 OSSmooth 文件进行拓扑优化
bracket_size.stat	分析进程概要，提供分析进程中每一步的 CPU 信息

从 OptiStruct 中得到的尺寸优化结果在两处给出：bracket_size.out 文件包含每次迭代的厚度和体积信息；bracket_size.h3d 包含所有迭代的单元厚度结果与用于线性静态分析的第 0 步和第 3 步迭代的位移和应力结果。下面介绍如何查看所有结果。首先用 HyperView 查看二进制结果文件中的结果，然后查看存储在 bracket_size.out 中的尺寸变化过程。

STEP 09 查看应力结果

在尺寸优化以后，查看应力数值，以确认未违反应力约束。

（1）当看到 Process completed successfully 后，单击 HyperView 按钮。

（2）此步骤启动 HyperView 并打开结果文件。一个消息窗口出现，通知用户模型和结果

文件成功载入至 HyperView。注意到所有的 h3d 文件均被载入，每个都在 HyperView 的不同页中。files bracket_size_des.h3d 和 bracket_size_s2.h3d 分别在第二和第三页载入。

（3）单击 Close 按钮关闭消息框。

（4）单击 Next Page 按钮。第三页载入了 bracket_size_s1.h3d 文件的结果。注意到该页的名称显示为 Subcase 1 – STEP，提示用户结果与 Subcase 1 吻合。

（5）单击 Contour 按钮。

（6）选择 Result type 下的第一个下拉菜单并选择 Element Stresses [2D & 3D]（t）。

（7）在第二个下拉菜单下，选择 vonMises 命令。

（8）在 Averaging method 下选择 None 命令。

（9）单击 Apply 按钮，此时出现了显示 von Mises 应力的云图。模型中的每个单元都被分配了一种颜色，显示该单元在载荷和边界条件作用下受到的力的大小。如果不改变迭代步，则将显示初始迭代的云图。如果要显示最终迭代云图，则通过状态栏切换到最后一个迭代步。

（10）单击状态栏右侧的第一个或第二个域，将出现工况模拟选择窗口。

（11）在 Simulation 列表下单击 Iteration #。注意到只有两个迭代步显示，第一个和最后一个（FL）为优化模拟的默认设置。如果要改变这个设置，添加 OUTPUT 控制卡片，将频率设置为 ALL。

（12）单击 OK 按钮。这一步将绘制该工况下的最终迭代云图，查看应力，以确认未违反应力约束。

STEP 10 查看厚度结果

（1）单击 Previous Page 按钮移动到 First 页。

（2）确保 Result type 设置为 Element Thicknesses（s）。

（3）从 Load Case and Simulation Selection 窗口中选择 Iteration 2。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）可以通过记事本打开 bracket_size.prop 文件来查看两部分的最终厚度。

.out 文件包含了优化过程概要。从.out 文件的信息中，可以看到目标函数、约束、设计变量是如何从一个载荷步变化到另一个载荷步的。

STEP 11 更新设计变量

（1）在 Analysis 页面下，单击 optimization 进入面板。

（2）选择 discrete dvs 进入面板。

（3）单击 name=并输入 DDV1。

（4）单击 from=并输入 0.5，用相同的方法在 to=输入 0.3，在 increment=输入 0.1。使用 Tab 键可以提高效率。

（5）单击 create 按钮。这样就创建了离散设计变量，起始值为 0.5，终止值为 3.0。变量

每次增加 0.1，这样就从 0.5 变化为 0.6、0.7、0.8 直到 3.0。

（6）创建另一个设计变量 DDV2，与 DDV1 使用相同的离散值。

（7）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

（8）选择 size 面板。

（9）使用面板左侧单选框，选择 desvar 子面板。

（10）单击 desvar =并选择 part1。

（11）设置 no ddval 为 ddval =。

（12）单击 ddval=并从列表中选择 DDV1。

（13）单击 update 按钮。

（14）设计变量 part1 更新完成，设计变量与名为 DDV1 的 DDVAL （离散设计变量值）关联在一起。

（15）重复（10）～（13）更新 part2。

（16）单击 return 按钮返回 Optimization Setup 面板。

STEP 12 存储 HyperMesh 数据

（1）在 File 下拉菜单中，选择 Save As 命令。

（2）弹出 Save file 对话框。

（3）选择想要保存数据的路径，并输入文件名 bracket_size.hm，单击 Save 按钮。

STEP 13 启动 OptiStruct

（1）在 Analysis 页面下选择 OptiStruct 面板。

（2）在 input file 域后单击 Save as 按钮。

（3）弹出 Save file 对话框。

（4）在 File name 域选择你要保存 OptiStruct 文件的路径，并输入文件名 bracket_size.fem。

（5）以.fem 作为扩展名的文件是 OptiStruct 的运算输入文件。

（6）单击 Save 按钮。

（7）注意到 bracket_size.fem 文件的文件名和路径在域 input file 中显示。

（8）设置 memory options 为 memory default。

（9）单击 run options 并选择 optimization。

（10）设置 export options 为 all。

（11）单击 OptiStruct 按钮。

STEP 14 查看应力结果

尺寸优化完成后，应该检查应力结果确保没有违反应力约束条件。分析结果在第二页（第一页为优化结果）。

（1）当看到 Process completed successfully 出现在命令窗口后，单击 HyperView 按钮。

这样就打开了 HyperView，进入到新的页面，载入结果文件。出现一个消息窗口提示载入文件成功。注意到所有的 h3d 文件均被载入，每个都在 HyperView 的不同页上。文件 discrete_bracket_size_des.h3d 和 discrete_bracket_size_s2.h3d 分别在第二页和第三页载入。

（2）单击 Close 按钮关闭消息窗口。

（3）单击 Next Page 按钮进入第二页。

（4）第二页载入了文件 discrete_bracket_size_s1.h3d。注意到该页的名称为 Subcase 1 – STEP，提示结果文件和 Subcase 1 相一致。

（5）单击 Contour 按钮。

（6）选择 Result type 下的第一个下拉菜单并选择 Element Stresses [2D & 3D]（t）。

（7）在第二个下拉菜单中选择 vonMises 命令。

（8）在 Averaging method 下选择 None 命令。

（9）单击 Apply 按钮，结果如图 4-2 所示。

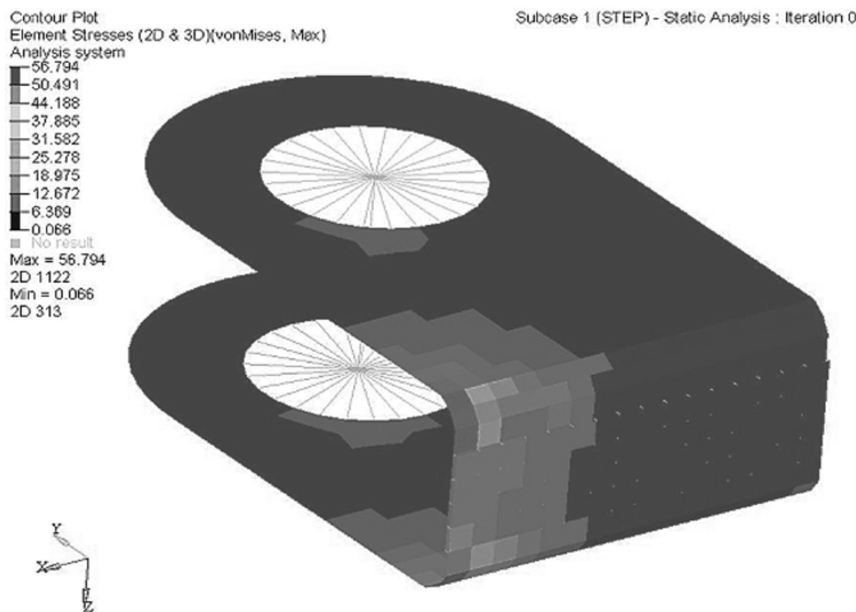


图 4-2　初始形状的应力云图

此时出现了 von Mises 应力云图。每一个单元被赋予颜色以显示单元在载荷和约束作用下的应力状态。如果没有改变初始载荷步，则云图为初始状态下的颜色，通过状态栏改变该工况下的迭代步至最后一步。

（10）从 Simulation 列表，通过 Results Browser 下拉菜单选择最后迭代步 Iteration #。

注意到只显示了两个迭代步，第一个和最后一个（FL），这是优化计算的默认设置。如要改变这个设置，添加 OUTPUT 卡片，将频率设置改为 ALL。

这样就绘制出了工况下最终迭代步的云图，如图 4-3 所示。请检查应力是否在约束下。

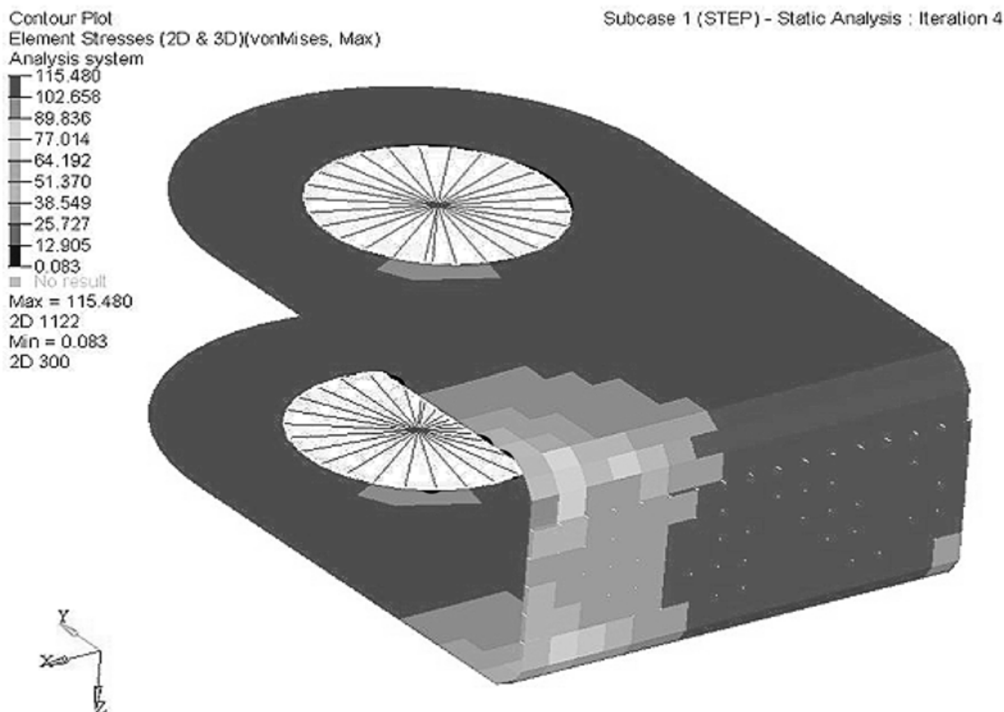


图 4-3　优化设计 von Mises 应力云图

4.2　实例：碎纸机的尺寸优化

本实例介绍使用 OptiStruct 进行碎纸机结构尺寸优化。尺寸优化涉及改变 1-D 或 2-D 单元的属性，这些属性包括 1-D 单元的面积、惯性矩以及 2-D 单元的厚度等。在不希望删除材料、生成加强肋或者改变结构形状的情况下可以进行尺寸优化。粉碎机有限元模型如图 4-4 所示。

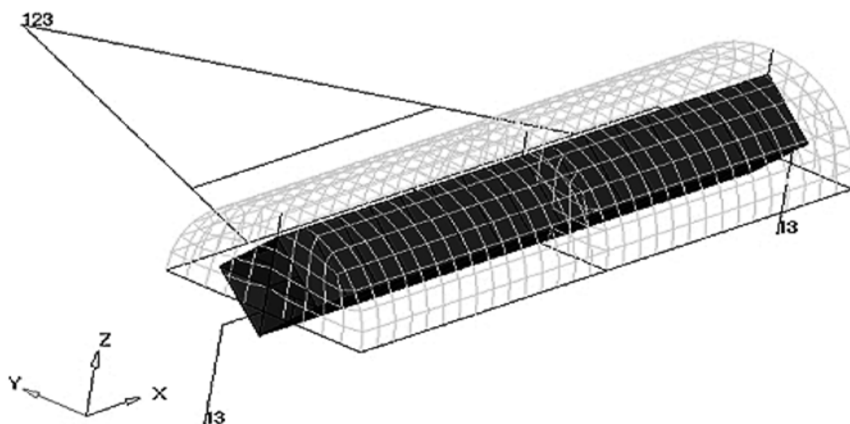


图 4-4　粉碎机有限元模型

通过优化单元的截面属性尺寸以达到一定的设计目标，这些属性通过 DVPRL 卡片与设计变量（DESVAR）关联。

本实例将介绍如何对一个壳单元和梁单元的组合模型定义尺寸优化。其中，可通过改变 PBARL 属性卡片模拟梁单元属性以及关联设计变量。最终的优化设计方案将拥有更高的固有频率和新的单元属性。

在本实例中，也会用到 OptiStruct 用户模板下的 OptiStruct 宏菜单设置此优化问题。

问题描述如下。

- ✓ 设计目标：总质量最小化。
- ✓ 设计约束：横向震动频率高于 6Hz。
- ✓ 设计变量：梁的宽度、厚度、深度以及壳单元的厚度。

本实例包括以下内容：

- ✓ 进行有限元分析并检查结果。
- ✓ 定义 1-D 单元属性的尺寸优化。
- ✓ 优化结果后处理。

STEP 01 启动 HyperMeshDesktop，设置 UserProfile，导入有限元文件

（1）启动 HyperMesh Desktop。

（2）选择 OptiStruct 作为 User Profile。

（3）单击 OK 按钮。这样就加载了用户配置。它包括与以 Bulk 数据格式组织模型的 RADIOSS 和 Optistruct 相对应的 HyperMesh 的功能的面板、宏菜单和导入器。

（4）在工具栏的 File 下拉菜单中，选择 Import 中的 Solver Deck。

（5）在标签目录中添加了 Import 标签。

（6）选择 Import type 为 FE Model。

（7）选择 File type 为 OptiStruct.。

（8）单击 Select Files 按钮，找到 shredder.fem 文件，文件位于 HyperWorks 安装目录下 /tutorials/hwsolvers/optistruct/文件夹内。

（9）单击 Open 按钮。

（10）单击 Import 按钮。

（11）单击 Close 按钮关闭 Import 标签。执行有限元分析并检查结果

STEP 02 对模型进行模态分析

在定义优化步骤前先进行一个模态分析。在优化前进行分析来识别结构的响应，这样就可以保证优化中定义的约束是合理的。

（1）在 Analysis 页面下，选择 Radioss 面板。

（2）在 input file 域后单击 save as 按钮。

（3）在 File name 域中选择想要保存 shredder_analysis.fem 文件的路径，并输入文件名。

（4）单击 Save 按钮。注意到 shredder_complete.fem 文件的路径和文件名在 input file 域

中显示。

（5）设置 export options 为 all。

（6）单击 run options 切换为 analysis。

（7）设置 memory options 为 memory default。

（8）options 留为空白。

（9）单击 Radioss 按钮。这样就开始了 Radioss 求解。

如果计算成功，则将在 Radioss 模型所在的目录中看到新的结果文件。如果计算出错，shredder_analysis.out 文件可以有效地帮助查看错误信息并调试输入文件。

STEP 03 查看碎纸机模态

（1）在 Radioss 面板，单击 HyperView。HyperView 程序在新的一页中打开，shredder_analysis.mvw 文件被载入。该文件与 shredder_analysis.h3d 文件相关联，shredder_analysis.h3d 文件包含了模型和结果文件。

（2）单击 Close 按钮退出 Message Log 菜单。

（3）设置动画类型为 Modal。

（4）选择 Deformed 按钮。

（5）将 Result type 设置为 Eigen Mode（v）。

（6）设置 Scale 为 Model Units。

（7）设置 Type 为 Uniform，并在 Value 中输入缩放系数 1000。这意味着最大位移是放大 1000 倍，其他位移也会成比例变化。使用比例因子大于 1.0 放大变形，而小于 1.0 的比例系数会减少变形。此时在各个方向使位移加剧。

（8）在 Undeformed shape 下设置 Show 为 Edges。

（9）设置 Color 为 Mesh。

（10）单击 Apply 按钮。

（11）在 Results Browser 中，使用 Simulation 下拉菜单并选择 Mode 1，单击 OK 按钮，如图 4-5 所示。

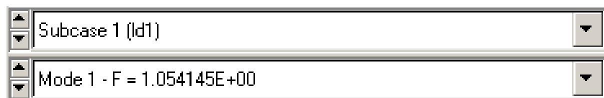


图 4-5　结果选择

（12）单击 contour 按钮，并单击 Apply 按钮绘制模态云图。

（13）单击 Note 按钮移除第一行，保留其他的，单击 Apply 按钮，如图 4-6 所示。

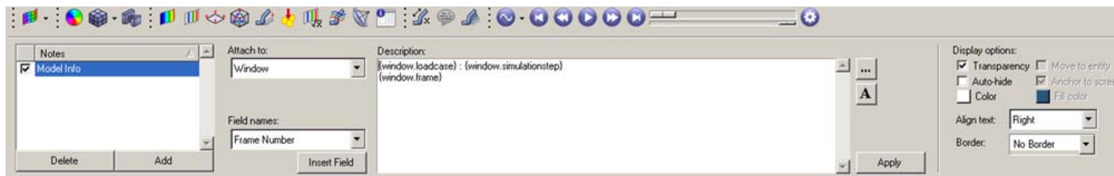


图 4-6　添加注释

（14）单击 Page Window Layout，选择 4 个窗口⊞，如图 4-7 所示。

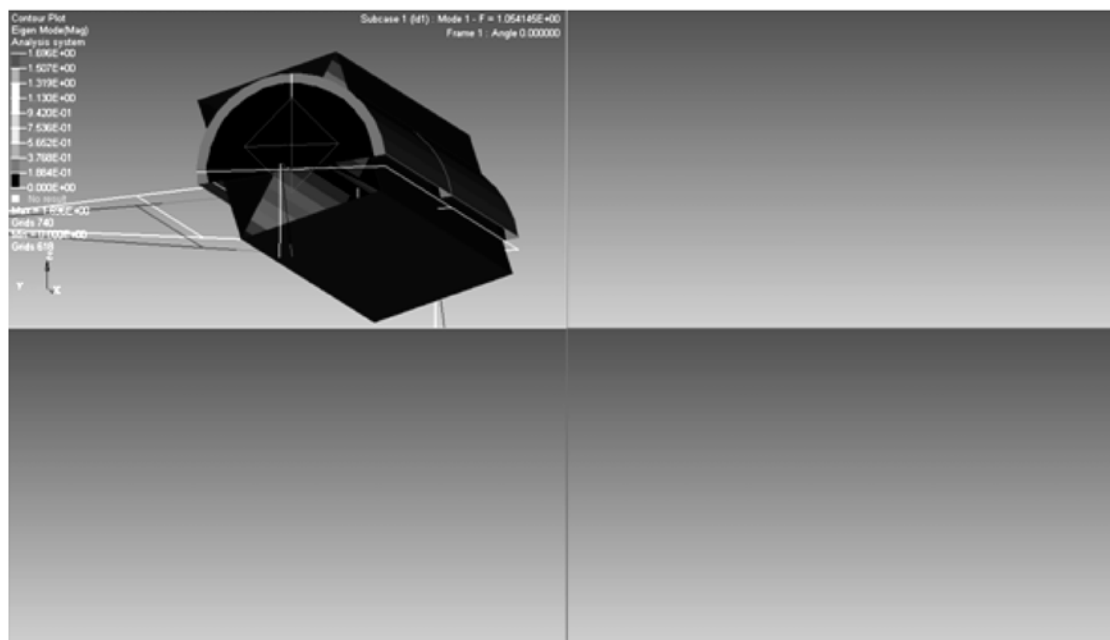


图 4-7　窗口分割

（15）单击第一个窗口，从 Edit 下拉菜单中选择 Copy Window 命令。

（16）单击第二个窗口，从 Edit 下拉菜单中选择 Paste Window 命令。

（17）在第三和第四窗口重复第 18 步，如图 4-8 所示。

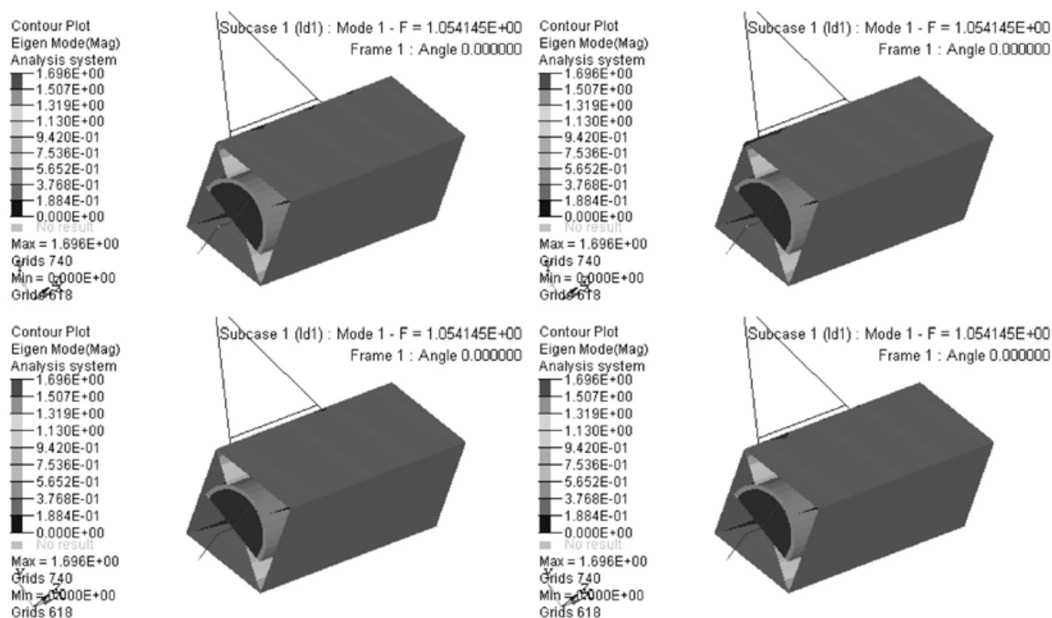


图 4-8　第一阶模态云图

（18）接下来，更新用第二、第三、第四阶模态更新第二、第三、第四个窗口。这个可以通过选择并单击 Hyper View Entities 上的模态选择窗口（在 Results Browser）来实现。选择每个窗口，并使用下拉选择器来选择想要显示的模态，如图 4-9 和图 4-10 所示。

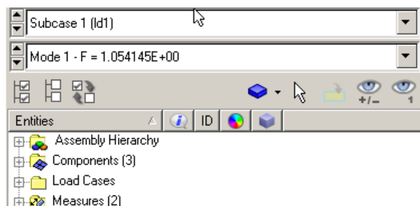


图 4-9　模态结果选择

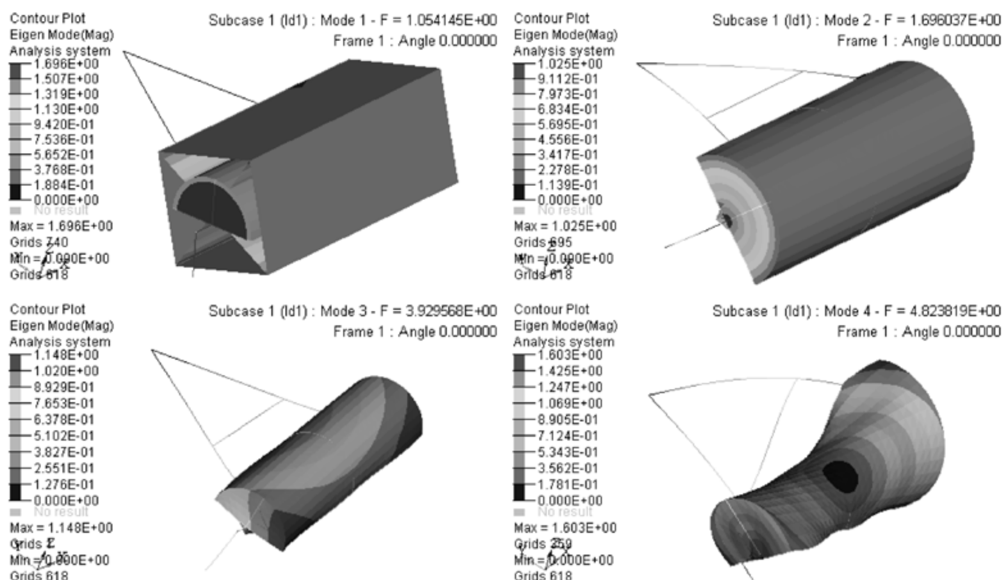


图 4-10　固有频率云图

（19）在动画控制栏中单击“播放”按钮开始动画，再次单击该按钮停止动画。

第三阶和第四阶模态（3.9Hz 和 4.8Hz）在碎纸机受到激励时有一个横向的变形，会影响到碎纸机的性能。因此优化目标是最低频率大于 7Hz。

（20）从 File 下拉菜单，单击 Save as 中的 Report Template。

（21）设置 save as type 为 Report definition（*tpl）。

（22）在 File name 输入 report.tpl，如图 4-11 所示。

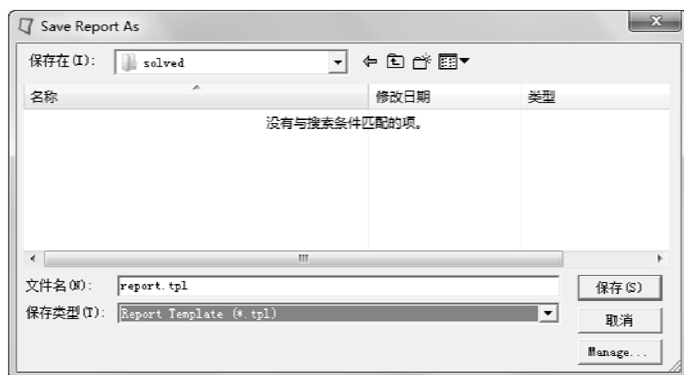


图 4-11　文件选择对话框

（23）单击“页面导航器”按钮返回 HyperMesh。

STEP 04 通过 Size 面板定义设计变量

该问题的设计变量是 cover 的厚度，梁的宽度、厚度和深度。这里将使用 Size 面板定义第一个设计变量。

（1）在 Analysis 页面，单击 optimization 面板。

（2）单击 size 面板。

（3）确认 desvar 子面板已被选中。

（4）单击 desvar =，并输入 covethck。

输入以下数值 initial value =3.0，lower bound =1.0，upper bound =6.0。如图 4-12 所示。

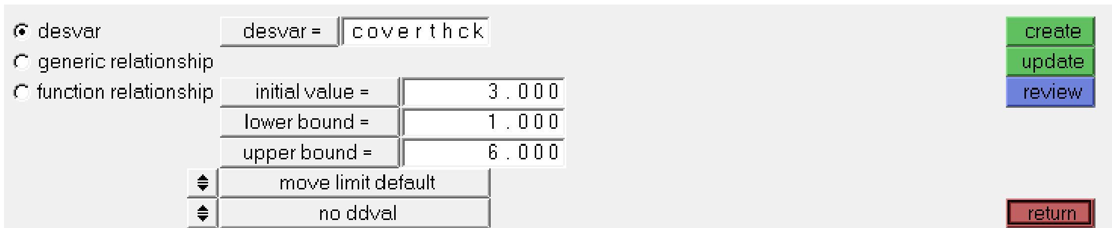


图 4-12　创建尺寸变量

（5）单击 create 按钮。

（6）用类似的方法在 size 面板创建另外 4 个设计变量，使用表 4-2 所示的上下限及初始值。

表 4-2　上下限及初始值

名　　称	初　始　值	下　　限	上　　限
横梁宽度（Beamwide）	50	30	90
横梁高度（Beamhigh）	100	80	125
横梁厚度 1（Beamthck1）	10	5	15
横梁厚度 2（Beamthck2）	20	15	30

STEP 05 对设计变量分配 cover 的厚度

（1）仍然通过 size 面板，使用左侧单选框选择 generic property 子面板。

（2）在 dvprel =输入 covethck。

（3）为 C0 设置数值 0.0。

（4）单击 prop 按钮选择 cover。

（5）确认属性选择为 Thickness T。

（6）单击 designvars 按钮并激活 covethck。

（7）单击 return 按钮。

（8）单击 create 按钮。

（9）单击 return 按钮。

STEP 06 定义梁的尺寸属性

尺寸如图 4-13 所示。在此步骤中，C 形梁的每个尺寸将会作为设计变量。表 4-3 中列出了初始设计尺寸。

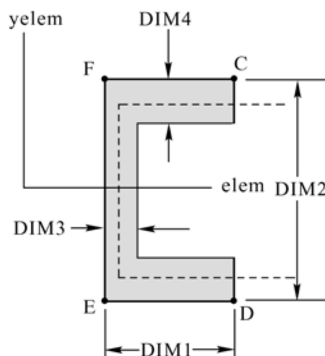


图 4-13 梁的尺寸

表 4-3 C 形梁的初始设计尺寸

名 称	对 应 尺 寸	值
DIMs（1）	横梁宽度	50
DIMs（2）	横梁高度	100
DIMs（3）	横梁厚度 1	10
DIMs（4）	横梁厚度 2	20

（1）在 size 面板下，通过单选框选择 generic property 子面板。

（2）在 dvprel =设置名称为 DIM1。

（3）在 C0 设置值为 0.0。

（4）单击黄色 prop 框，选择 frame2。

（5）确认 property 为 Dimension1。

（6）单击 designvars 并激活 Beamwide。

（7）单击 return 和 create 按钮。

（8）在 dvprel =设置名称为 DIM2。

（9）在 C0 设置数值为 0.0。

（10）单击黄色 prop 框，选择 frame2。

（11）切换属性为 Dimension2。

（12）单击 designvars 并激活 Beamhigh。

（13）单击 return 和 create 按钮。

（14）在 dvprel =输入名称 DIM3。

（15）在 C0 设置值为 0.0。

（16）单击黄色 prop 框并选择 frame2。

（17）切换 property 为 Dimension3。

（18）单击 designvars 激活 Beamthck1。

（19）单击 return 和 create 按钮。

（20）在 dvprel =输入名称为 DIM4。

（21）在 C0 设置数值为 0.0。

（22）单击黄色 prop 框，选择 frame2。

（23）切换 property 为 Dimension4。

（24）单击 designvars 并激活 Beamthck2。

（25）单击 create 按钮。

（26）单击 return 按钮。

STEP 07 定义响应

（1）单击 responses 面板。

（2）在 response =输入名称 mass。

（3）确认 response type 为 mass。

（4）单击 create 按钮。

（5）在 response =输入名称 f3。

（6）改变 response type 为 frequency。

（7）设置 Mode Number 为 3。

（8）单击 create 按钮。

（9）重复 5～8 步创建 response=为 f4，以及 Mode Number 为 4。

（10）单击 return 按钮退出面板。

STEP 08 创建约束

（1）单击 dconstraints 按钮。

（2）在 constraint =输入名称 c_f3。

（3）激活 lower bound =，输入数值 6.0。

（4）单击 response =并选择 f3。

（5）单击 loadstep 按钮并激活 ld1，单击 select 按钮。

（6）单击 create 按钮。

（7）使用以下数值重复 2～6 步，设置 constraint=为 c_f4，lower bound =为 6.0，response =为 f4，loadstep 为 ld1。

（8）单击 return 按钮退出面板。

STEP 09 定义目标函数

（1）单击 objective 按钮。

（2）单击 response =并选择 mass。

（3）单击 create 按钮。

（4）单击 return 按钮两次退出面板。

STEP 10 保存数据

（1）在 File 下拉菜单下，选择 Save as 中的 Model。

（2）在 Save file 窗口下，选择保存路径并保存文件为 shredder_optimization.hm。

（3）单击 Save 按钮。

STEP 11 运行尺寸优化

（1）在 Analysis 页下，选择 OptiStruct 面板。

（2）设置 export options 为 all。

（3）单击 run options：选择 optimization。

（4）设置 memory options 为 memory default。

（5）单击 OptiStruct 按钮。这样就开始了 OptiStruct 求解。

如果计算成功，则将在 OptiStruct 模型所在的目录中看到新的结果文件。如果计算出错，则 shredder_optimization.out 文件可以有效地帮助查看错误信息并调试输入文件。

STEP 12 查看优化后的厚度结果

（1）在命令窗口中看到 Process completed successfully 字样后，关闭窗口。

（2）在 OptiStruct 面板下单击 HyperView，将会自动将结果文件载入 HyperView。

（3）弹出一个消息框，提示模型文件和结果文件成功载入。

（4）单击 Close 按钮关闭消息窗口。

（5）在 Graphics 下拉菜单下选择 Select Load Case 命令。

（6）在 Simulation 窗口，选择最后一个迭代步 Iteration #，单击 OK 按钮。

（7）单击 Contour 按钮。

（8）在 Result type 选择第一个下拉菜单并选择 Element Thicknesses （s）和 Thickness。

（9）单击 Apply 按钮。

（10）最后生成的颜色显示了在载荷和边界条件作用下的厚度。注意到最终优化的 cover 部件厚度为 1.0。

（11）用记事本打开 shredder_optimization.prop 查看 PBAR 属性的最优结果，如图 4-14 所示。

```
PBARL          1       1          CHAN
+       71.92322 125.0       5.0     15.0       0.0
$ A=2632.697 I1=6924729. I2=1367018. I12=      0.0 J=160785.6 K1=.1804234 K2=.7626008
```

图 4-14　prop 文件中的属性

最终尺寸为如下。

横梁宽度（DIM1）： 71.92
横梁高度（DIM2）： 125
横梁厚度 1（DIM3）： 5
横梁厚度 2（DIM4）： 15
当写入模式开启时，此 prop 文件可以在 HyperMesh 中读取，PBARL 卡片会被更新。

4.3 实例：飞机翼肋的自由尺寸优化

本实例将演示如何对一个铝制翼肋（见图 4-15）进行自由尺寸优化。

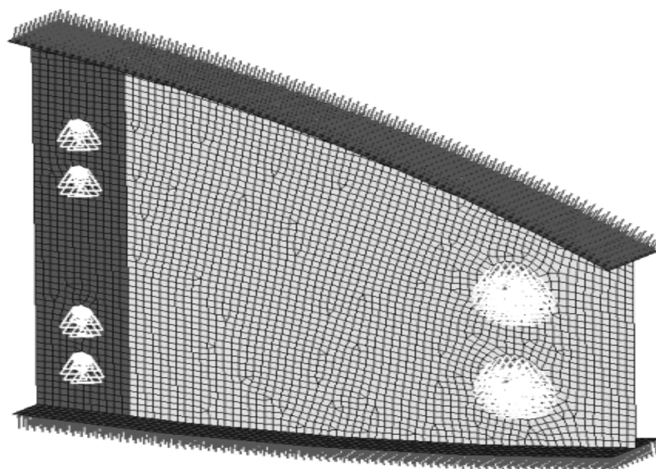


图 4-15 翼肋模型

在模型中有 4 个壳单元组成的部件：连接板、腹板、顶部和底部翻边以及螺栓。用间隙单元模拟腹板与螺栓之间的接触，模型中已经定义了适当的属性、载荷、边界条件以及非线性的工况等。设计区域是腹板，其余的部分是非设计区域，因为大部分的航天部件是薄壁结构，因此这些结构由机加工或精密加工制造，非常适合用自由尺寸优化。为了了解拓扑优化的局限性，也对翼肋模型进行非线性的间隙拓扑优化。

优化问题描述如下。

✓ 设计目标：最小化加权应变能 WCOMP。
✓ 设计约束：腹板体积分数< 0.3。
✓ 自由尺寸优化设计变量：设计空间的每个壳单元厚度。
✓ 拓扑优化设计变量：设计空间的所有单元的单元密度。

本实例包括以下内容：

✓ 设置自由尺寸非线性间隙优化问题。
✓ 设计区域厚度分布进行后处理。
✓ 设置非线性间隙拓扑优化。
✓ 设计空间材料分布经常后处理。
✓ 浏览比较自由尺寸优化和拓扑优化的结果。

STEP 01 打开 HyperMesh Desktop，设置 User Profile，打开文件

（1）启动 HyperMesh Desktop。

（2）在 User Profile 对话框中选择 OptiStruct 并单击 OK 按钮。

（3）在工具栏上的 File 下拉菜单，选择 Open 命令。

（4）弹出 Open file 对话窗口。选择 rib_complete.hm 文件，该文件位于 HyperWorks 安装路径下的/tutorials/hwsolvers/ optistruct/文件夹内。

（5）单击 Open 按钮。

STEP 02 为自由尺寸优化创建设计变量

（1）在 Analysis 页下，选择 optimization 面板。

（2）选择 free size 面板。

（3）在左边的单选框中选择 create 子面板。

（4）单击 desvar=并输入 shells。

（5）确认 type 已经设置为 PSHELL。

（6）单击 props 按钮，选择 Web component ，单击 select 按钮。

（7）单击 create 按钮。

（8）这样就创建了自由尺寸优化的设计变量。

STEP 03 为自由尺寸优化定义制造工艺约束

（1）在 Free Size Optimization 面板中选择 parameters 子面板。

（2）单击 desvars 选择之前创建的 shells 设计变量。

（3）切换 minmemb off 为 mindim =并输入 2.0。

（4）单击 update 按钮。

（5）单击 return 按钮。

STEP 04 定义优化的响应、目标以及约束

（1）选择 responses 面板，新建加权应变能响应。

（2）在 response =处输入名称 wcomp。

（3）单击 response type 切换开关，并通过使用>>进入下一页面，单击 weighted comp。

（4）单击 loadsteps 并同时选择 Coup_Ver 和 Pressure 工况，加权因子都是 1。

（5）单击 return 按钮。

（6）单击 create 按钮。

（7）在 response =处输入名称 volfrac 建立体积分数响应。

（8）在 response type，用<<进入前面的页面并单击 volume frac 按钮。

（9）设置 type 为 total。

（10）单击 create 按钮。

（11）单击 return 按钮。

（12）单击 dconstraints 面板定义体积分数约束。

（13）在 constraint =处输入名称 vol。

（14）单击 response =并选择 volfrac 响应。

（15）在 upper bound =处输入 0.3。

（16）单击 create 按钮。

（17）单击 return 按钮。

（18）单击 objective 面板定义目标函数。

（19）切换为 min。

（20）在 response =处选择 wcomp 响应。

（21）单击 create 按钮。

（22）单击 return 按钮两次退出面板。

至此，优化参数定义完成。

STEP 05 运行自由尺寸非线性间隙优化计算

（1）在 Analysis 页下，选择 OptiStruct 面板。

（2）在 input file 域下单击 Save as 按钮。选择想要存储文件的路径和文件名，在 File name 域中输入 rib_freesize.fem。

（3）单击 Save 按钮。注意到 rib_freesize.fem 文件名和路径显示在 input file 域内。

（4）设置 export options 为 all。

（5）单击 run options 选择为 optimization。

（6）设置 memory options 为 memory default。

（7）单击 OptiStruct 按钮。这样就开始了 OptiStruct 计算。

如果计算成功，将在 OptiStruct 模型所在的目录中看到新的结果文件。如果计算出错，rib_freesize.out 文件可以有效地帮助查看错误信息并调试输入文件。

STEP 06 Step06：设计空间厚度分布后处理

OptiStruct 输出每次迭代单元厚度分布，默认输出第一步和最后一步迭代每一工况的位移和应力结果，下面描述如何使用 HyperView 浏览结果。

（1）在 OptiStruct 面板下，单击 HyperView 按钮。

（2）启动 HyperView 并载入 rib_freesize.mwv，该文件与.h3d 文件关联，定义模型和结果文件。

（3）单击 Close 按钮关闭对话框。

（4）单击工具栏上的 Entity Attributes 图标，隐藏除了 Web 之外的所有部件。可以通

过激活 Auto apply mode：（Display OFF），然后在操作界面中单击想要隐藏的部件来实现。

（5）单击 Mesh，渲染网格选项。

（6）单击 Web component 得到渲染的网格。

（7）进入 Contour 面板，并设置 Result type 为 Element Thicknesses。

（8）在 Graphics 下拉菜单中，选择 Select Load Case 打开 Load Case and Simulation Selection 对话框。

（9）选择 Simulation 列表中的最后一个迭代步并单击 OK 按钮。

（10）单击视图控制区（在 HyperView 面板右下部）的 Top 按钮，得到 Web 的顶视图。

（11）单击 Apply 按钮，将显示 Web component 的单元厚度云图，如图 4-16 所示。

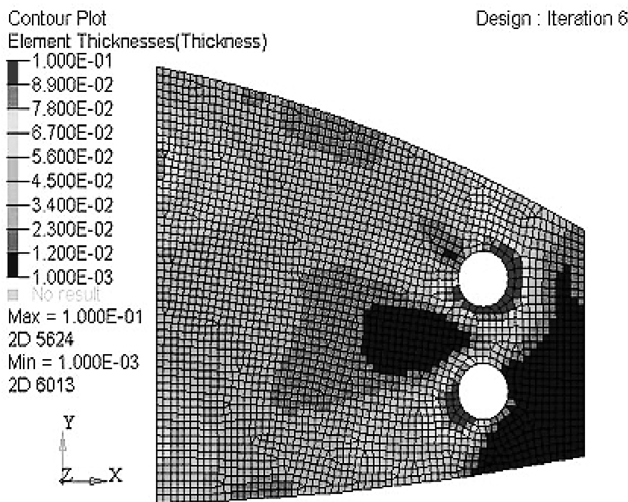


图 4-16　自由尺寸非线性间隙优化的单元厚度云图（原始厚度为 0.1mm）

从图 4-16 中可以看出，自由尺寸的优化结果在大块区域优化腹板的厚度分布，有利于加工，而且自由尺寸优化所得到的设计提供同时生成空腔、肋板并且改变厚度的自由，这在拓扑优化中是不可能的。

（12）使用页面导航控制键返回第一个和 HyperMesh。

STEP 07 为拓扑优化创建设计变量

（1）通过选择 File 下拉菜单保存当前文件，并单击 Save as 中的 Model。选择将运行优化的文件路径并输入 rib_freesize.hm 作为文件名。

（2）单击 save 按钮。

（3）按〈F2〉键进入 Delete Entities 面板。删除为自由尺寸建立的设计变量 shells。

（4）切换为 select designvars。

（5）单击 designvars 按钮，选择 shells，并单击 select 按钮。

（6）单击 delete entity 按钮。

（7）在消息栏中将出现“1 entity was deleted”。

（8）单击 return 按钮。

（9）在 Analysis 页面下，选择 optimization 面板。

（10）选择 topology 面板。

（11）选择 create 子面板。

（12）在 desvar =输入 shells。

（13）单击 props 按钮，选择 Web component，并单击 select 按钮。

（14）在 type 页面下，选择 PSHELL 并使 base thickness 为 0.0。

（15）单击 create 按钮。Web component 已被定义为拓扑优化的设计部件。

STEP 08 创建拓扑优化的制造工艺约束

（1）通过选择 File 下拉菜单保存当前文件，并单击 Save as 中的 Model。

（2）选择将运行优化的位置并输入 rib_topology.hm 作为文件名。

（3）单击 save 按钮。

（4）选择 Topology Optimization 面板左边的单选框以进入 parameters 子面板。

（5）在 desvars =页面下，选择 shells。

（6）切换 minmemb off 为 mindim =，并输入 2.0 作为最小成员控制尺寸。

（7）单击 update 按钮。

（8）单击 return 按钮两次。

STEP 09 运行非线性间隙拓扑优化计算

优化的响应约束以及目标都已经定义。

（1）在 Analysis 页面选择 OptiStruct 面板。

（2）确认 rib_topology.fem 文件在 input file：域中显示。

（3）设置 export options 为 all。

（4）单击 run options 切换为 optimization。

（5）设置 memory options 为 memory default。

（6）单击 OptiStruct 按钮。OptiStruct 优化计算开始。

如果计算成功，则将在 OptiStruct 模型所在的目录中看到新的结果文件。如果计算出错，rib_topology.out 文件可以有效地帮助查看错误信息并调试输入文件。

STEP 10 设计区域的材料分布后处理

OptiStruct 输出每次迭代单元厚度分布以及第一步和最后一步迭代每一工况的位移和应力结果。

（1）在 OptiStruct 面板下单击 HyperView 按钮。

（2）启动 HyperView 并载入 rib_topology.mvw，该文件与.h3d 文件关联，定义模型和结

果文件。

（3）单击 Close 按钮关闭对话框。

（4）单击工具栏上的 Entity Attributes 图标，隐藏除了 Web component 之外的其他部件。可以通过激活 Auto apply mode：（Display OFF），然后在操作界面中单击想要隐藏的部件来实现。

（5）单击 Mesh。

（6）单击 Web component 得到渲染的网格。

（7）进入 Contour 面板，选择 Result type 为 Element Densities。

（8）单击操作界面右下方的状态栏激活 Load Case and Simulation Selection 对话框。

（9）选择 Simulation 列表中的最后一个迭代步并单击 OK 按钮。

（10）单击视图控制区（在 HyperView 面板右下部）的 Top 按钮，得到 Web 的顶视图。

（11）单击 Apply 按钮，将显示 Web component 的单元密度云图，如图 4-17 所示。

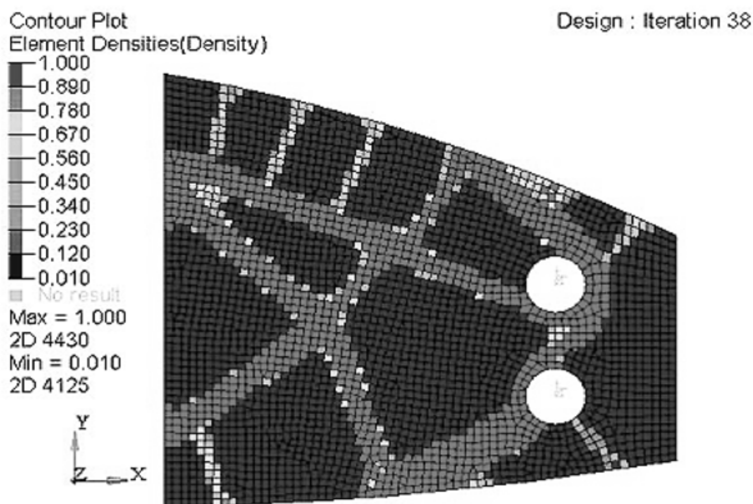


图 4-17　非线性间隙拓扑优化的单元密度云图

优化的结果跟预期一样很不连续。

比较自由尺寸优化和拓扑优化的结果：

拓扑优化的结果是桁架结构，带有大量的空腔和间隙，而自由尺寸优化的结果则是剪切板结构。对实体单元，只能选择实体或空隙的密度分布；对壳单元，中间密度可以用不同的厚度来实现，由于惩罚因子的作用，可能使某些单元的厚度变得很小，因而产生潜在的无效薄壳结构。另外，大部分航空结构是壳结构，剪切板类型设计常能满足机加工的工艺性要求，自由尺寸优化在这些情况下是很有用的。

4.4　实例：集成外部函数的尺寸优化

本实例的有限元模型如图 4-18 所示。OptiStruct 中的标准响应将被传送到 HyperMath 脚本文件，由此产生的新的响应将作为优化设计的约束。由于 HyperMath 是一个编译器，因此用户无需编制 HyperMath 脚本文件就可以定制响应。

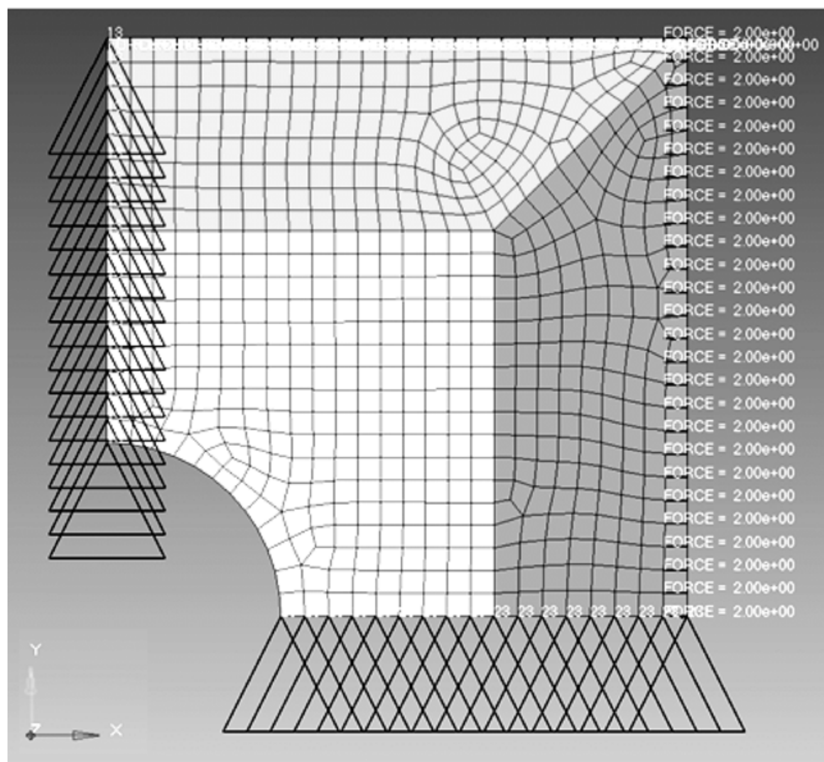


图 4-18　有限元模型

有限元模型中的材料，壳单元属性以及边界条件都已经定义完成。3 个部件的厚度是设计变量。单元 58 和 59（位于圆周孔上的单元）的 von Mises 应力定义为响应，总体积也作为响应定义。

单元 58 和 59 的 von Mises 应力作为输入文件输入进 HyperMath 脚本文件，然后返回两个数值：应力之和以及应力的平均值。

本实例的优化问题如下。

✓ 设计目标：体积最小。

✓ 设计约束：von Mises 应力之和以及平均值约束。

✓ 设计变量：3 部分厚度。

本实例包括的内容如下：

✓ 检查 HyperMath 脚本文件，计算内部响应。

✓ 使用 DRESP3 设定内部响应。

✓ 使用 OptiStruct 进行优化设计。

STEP 01 启动 HyperMath 和 HyperMesh Desktop，设置 User Profile，打开文件

（1）启动 HyperMath。

（2）在 File 菜单下，选择 open 并打开安装目录下的 dresp3_simple_h.hml 文件。

（3）检查 HyperMath 脚本文件，计算内部响应，如图 4-19 所示。

```
Script 1
dresp3_simple_h.hml
function MYSUM (iparam, rparam, iresp,  rresp, udata)
{
    /* iparam - vector of ints
       rparam - vector of doubles
       iresp - output parameter (vector of ints)
       rresp - output parameter (vector of doubles)
       udata - userdata
     */

     /* This function should modify iresp and rresp and not reallocate them
     l1, l2 = Size (iresp);
     print (l1, l2);
     nresp = l1 * l2;   */

    if (iresp[1] != 0)
    {
        rresp[1] = rparam[1] + rparam[2];
    }
    if (iresp[2] != 0)
    {
        rresp[2] = rparam[1]/2.0 + rparam[2]/2.0;
    }

    return true;
}
```

图 4-19　函数编辑

注意到 HyperMath 脚本文件与 MYSUM 函数一致，需要两个输入文件：rparam[1]和 rparam[2]；而且返回两个响应：rresp[1]——两个输入之和，rresp[2]——两个输入的平均值。计算完成后的响应 rresp[1]和 rresp[2]被返回 OptiStruct 用于优化。上面所说的脚本文件会在 OptiStruct 输入文件中关联到 DRESP3 相关卡片，此输入文件将 rparam[1]和 rparam[2]导入脚本，并接受脚本文件的输出。通过 DRESP3 将建立内部响应。

注意：在脚本文件中，可以对这一功能设定任意的名称，如 MYSUM、myresponses、sumandavg 等，但是不能设定函数自变量的名称，如 iparam、rresp、rparam 等。

（4）启动 HyperMesh Desktop。

（5）在 user profile 对话框选择 OptiStruct，单击 OK 按钮，这样就加载了用户配置。它包括与以 Bulk 数据格式组织模型的 RADIOSS 和 Optistruct 相对应的 Hypermesh 的功能的面板、宏菜单和导入器。

（6）User Profiles 界面也可以通过工具栏的 Preferences 下拉菜单进入。

（7）在工具栏的 File 下拉菜单中，选择 Import 中的 Solver Deck。

（8）确认 File type 为 OptiStruct。

（9）读取文件 File，在安装目录下的/tutorials/dresp3_simple.fem 文件。

（10）单击 Import 按钮。

（11）单击 Close 按钮。

STEP 02 将 HyperMath 脚本库附加到 OptiStruct

为了传递和接受需要的输入和输出文件，OptiStruct 需要 HyperMath 脚本的路径。这个

可以通过 LOADLIB 卡片来实现。

（1）在 Analysis 页面下，选择 control cards。

（2）单击 next 按钮。

（3）单击 LOADLIB 输入如下数据。

TYPE：DRESP3

GROUP：HLIB

PATH：hml 文件的路径

例如：c：/temp/dresp3_simple_h.hml。

注意：对于 HyperMesh Desktop 操作界面来说，输入文件路径和文件名是有占用空间限制的，如果完整的文件路径不符合要求，则请正常退出面板，在本练习的第五步手动编辑剩余部分。

（4）单击 return 按钮。

（5）单击 prev 按钮。

STEP 03 创建 DRESP3 卡片

3 个部件的厚度已经作为设计变量被定义。总体积的响应和单元 58 和 59 的 von Mises 应力响应也已经定义完成。

DRESP3 批量数据输入在当前 HyperMesh 版本中是不支持的。因此，这些卡片会在 BULK_UNSUPPORTED_CARDS 面板中定义。

注意：出现“$”符号说明数据不会被求解器读取。

（1）单击 BULK_UNSUPPORTED_CARDS 输入如下 DRESP3 信息，如图 4-20 所示。

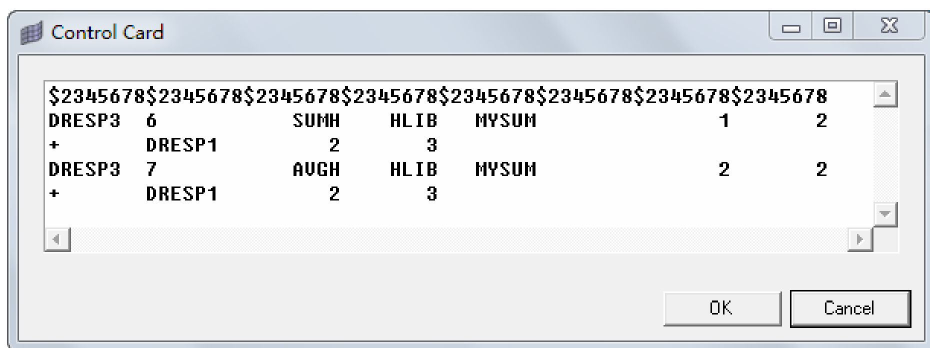


图 4-20　DRESP3 信息

这样就定义了两个内部响应：单元 58 和 59 的 von Mises 应力之和（SUMH）、单元 58 和 59 的 von Mises 应力平均值（AVGH）。

DRESP3 响应与 DRESP1 有不同的 ID 号，且指向第二步所定义的 HLIB 库。而且，MYSUM 的功能与 dresp3_simple_h.hml 脚本的功能相同。

这样就完成了 DRESP3 卡片与 HyperMath 脚本的关联。

STEP 04 建立 DCONSTR 卡片

（1）既然当前 HyperMesh 版本不支持 DRESP3 卡片，DCONSTR 卡片也不能从 dconstraints 面板被分配到 DRESP3。因此，也使用 BULK_UNSUPPORTED_CARDS 面板来添加 DCONSTR 卡片。

（2）在 BULK_UNSUPPORTED_CARDS 对话框打开时，在 DRESP3 信息下增加了如下的约束信息（DCONSTR and DCONADD），如图 4-21 所示。

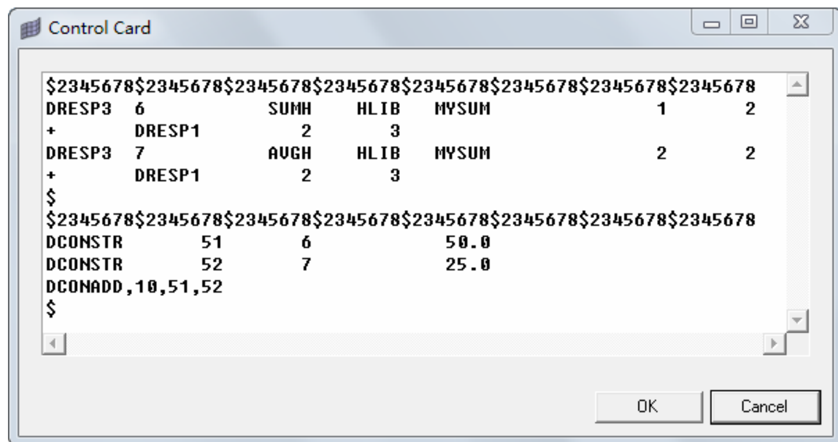


图 4-21 约束信息添加

（3）单击 OK 按钮。

（4）单击 return 按钮。

这样就各自定义了 SUMH 响应以及 AVGH 响应的上限，分别是 50 和 25。

STEP 05 运行优化问题

（1）在工具栏上的 File 下拉菜单，选择 Export 中的 Solver Deck。

（2）选择求解文件导出路径。

（3）单击，输入名称 dresp3_simple.fem，单击 Save 按钮。

（4）单击 Export 按钮。

（5）以.fem 为扩展名的文件是 OptiStruct 的求解输入文件。

（6）用记事本打开 dresp3_simple.fem。

（7）在工况信息页面的最上部添加如下信息：DESSUB = 10。

（8）保存文件。

（9）创建的 DRESP3s 是由工况决定的响应，因此可以在工况中参考到。DESSUB 可以做到这个。由于当前版本的 HyperMesh 不支持 DRESP3 批量数据输入，所以必须手动添加

路线。

（10）启动 OptiStruct 求解器操作界面：选择 start→All Programs→Altair HyperWorks→version 11→OptiStruct.。

（11）找到 dresp3_simple.fem 文件。

（12）单击 Run 运行优化。

（13）运行结束，对结果进行后处理。

注意：最终的 fem 数据文件 dresp3_simple_complete.fem，可以作为参考。

4.5 尺寸优化卡片

请先做完实例或者熟悉形状优化技术，然后查看卡片了解更多内容。

4.5.1 DESVAR 卡片

DESVAR 卡片定义尺寸优化变量，卡片格式如表 4-4 所示，卡片示例如表 4-5 所示。

表 4-4　DESVAR 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DESVAR	ID	LABEL	XINIT	XLB	XUB	DELXV	DDVAL		

表 4-5　DESVAR 卡片示例

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DESVAR	1	DV001	0.0	−1.0	1.0				

DESVAR 卡片关键字的解释如表 4-6 所示。

表 4-6　卡片解析

Field 域	Contents 内容
ID	唯一的设计变量标识号 （整型> 0）
LABEL	用户定义的变量名 （字符）
XINIT	变量初始值 （XLB 和 XUB 之间的实数）
XLB	设计变量下限值 （实数）
XUB	设计变量上限值 （实数）
DELXV	每个设计变量的初始增量限制 （实数> 0.0 或空白） 大小：变量本身的分数 （默认 = DOPTPRM 的值，参数 DELSIZ） 形状：变量　（XUB　－　XLB）变化范围的分数 （Default = DOPTPRM 的值，参数 DELSHP）
DDVAL	DDVAL 项的 ID，提供了一组离散值 （空白或者整型>0；默认=对连续型设计变量为空白）

DESVAR 卡片关键字的更多解释如下：

（1）只能设置初始值的增量限制，为了提高迭代稳定性和收敛速度，增量限制会自动调整。

（2）LABEL 必须由字母开头，且不能嵌入空格。

（3）如果设计变量是离散的（在 DDVAL 域下整型>0），并且 XLB 和（或）XUB 界限值域比 DDVAL 项中给定的离散量数列要宽，则 XLB 和（或）XUB 会被离散量的最小值和最大值代替。

（4）设置 XINIT=XLB=XUB 固定了设计变量。

4.5.2 DDVAL 卡片

DDVAL 卡片为离散变量优化定义离散、实数设计变量值。DDVAL 卡片格式如表 4-7 所示，DDVAL 替换格式如表 4-8 所示。

表 4-7 DDVAL 卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DDVAL	ID	DVAL1	DVAL2	DVAL3	DVAL4	DVAL5	DVAL6	DVAL7	

表 4-8 DDVAL 替换格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DDVAL	ID	DVAL1	"THRU"	DVAL	"BY"	INC			

表 4-9 所示的附加输入格式可以多次使用，并且在任何次序下使用。它们也可以在上面所说的任何格式下使用。附加输入格式 2，如表 4-10 所示。附加输入格式示例，如表 4-11 所示。

表 4-9 附加输入格式 1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	DVAL8	DVAL9	DVAL10	DVAL11	−etc.−				

表 4-10 附加输入格式 2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	DVAL8	"THRU"	DVAL9	"BY"	INC				

表 4-11 附加输入格式示例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DDVAL	110	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.4		
	.7	thru	1.0	by	0.05				
	1.5	20							

DDVAL 卡片关键字解释如表 4-12 所示。

表 4-12　DDVAL 关键字解释

Field 域	Contents 内容
ID	设置标识号的唯一的离散值 （整型>0）
DVALi	离散值 （实数或"THRU" 或 "BY"）
INC	离散值增量 （实数）

DDVAL 卡片关键字的更多解释如下：

（1）DDVAL 项必须被 DDVAL 域的 DESVAR 项引用。

（2）如果下一个记录的类型为 DVALi "THRU" DVALj "BY" INC，则 DDVAL 记录的尾随域可以为空。同时，当类型 DVALi "THRU" DVALj "BY" INC 在域 2～6 中使用时，域 7～9 必须为空。当类型 DVALi "THRU" DVALj "BY" INC 在域 3～7 的第一个记录中使用时，域 8～9 必须为空。在其他情况下，嵌入的空格是不允许的。

（3）DVALi 的顺序可以是任意的。

（4）DVALi "THRU" DVALj "BY" INC 格式定义了一个离散数据列，如 DVALi，DVALi+INC, DVALi+2.0*INC，…，DVALj。最后一个离散量 DVALj 是一直包含在内的，甚至当范围没有被 INC 均匀分割开的时候也是如此。

4.5.3 DVPREL1 卡片

DVPREL1 卡片用于关联设计变量与分析模型属性。通过下面的方程，线性关联设计变量与分析模型属性：

$$P_i = C0 + \sum COEFi \times DVIDi$$

DVPREL1 卡片格式如表 4-13 所示。

表 4-13　DVPREL1 卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DVPREL1	ID	TYPE	PID	PNAME/FID			C0		
	DVID1	COEF1	DVID2	COEF2	Etc.				

将 PSHELL 卡片（域 4）的厚度值与设计变量 5 关联起来，卡片格式如表 4-14 所示。

表 4-14　卡片关联

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DVPREL1	88	PSHELL	1	4			0.0		
	5	1.							

该例子与上述示例 1 相同。另外，它定义了 PNAME。卡片关联示例如表 4-15 所示。

表 4-15　卡片关联示例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DVPREL1	88	PSHELL	1	T			0.0		
	5	1.							

DVPREL1 卡片关键字的解释如表 4-16 所示。

表 4-16　DVPREL1 关键字解释

Field 域	Contents 内容
ID	关联标识号。对于其他 DVPREL1 卡片 ID 必须是唯一的 无默认值（整型> 0）
TYPE	将要被关联的属性类型（见DVPREL - Types） 无默认值（字符）
PID	属性标识号。当 PTYPE 为 PCOMPG 时，G#会在#为 GPLYID 的地方被使用。当 PTYPE 为 PCOMPP 时，P#会在#为 PLY ID 的地方被使用，见注释 2 无默认值（整型> 0）
PNAME/FID	属性名称，如“A”或“T”（正如在属性卡片的文档中所说的一样），或者在属性卡中的域号码。对于 PSHELL 属性 12I/T3 来说，只有域号码（6）是允许的。对于 PBARL 和 PBEAML 只有属性名称是允许的，不同部分使用不同域 无默认（字符或整型> 0）
C0	关联方程中的常量 默认= 0.0 （实数。默认= 0.0）
DVIDi	DESVAR ID. 无默认值（整型> 0）
COEFi	关联方程中的常量系数 默认= 1.0 （实数。默认=1.0）

DVPREL1 卡片关键字的更多解释如下：

（1）类型不能为 PSOLID。

（2）当类型为 PCOMPG 时，任一全局层或属性特有层会被选择。选择属性特有层时，该格式域与其他属性类型所使用的类似，在 PID 域内输入了 PCOMPG 的属性标识码，然后使用 PNAME 或 FID 来鉴定将要被关联的数值。在这个方案下，只有在 PID 域下给定 ID 的属性受到影响。选择全局层时，G#在 PID 域输入，#是全局层的 GPLYID。在此情况下，FID 是不适用的，因此 T 或者 THETA 被用在 PNAME 域来各自关联厚度或者方向。在这个方案下，所有使用给定 GPLYID 的均受到影响。

（3）当 TYPE 为 PCOMPP 时，P#在 PID 域中输入，#是 PLY 实体 ID。在此情况下，FID 是不适用的，因此 T 或者 THETA 在 PNAME 域中用来各自关联厚度或者方向。

（4）PBEAML 具有多于一种截面定义，可能不会被 DVPREL1 引用。

（5）PBARL/PBEAML 的属性必须通过 DIMs 来控制（也就是不能直接控制），除了 NSM。

（6）当 TYPE 为 PBARL 或 PBEAML 时，用户应该注意避免变量范围过大产生无效尺寸。例如，一根管的横截面内径不能超过外径。避免尺寸组合在物理上无效是非常必要的。在截面尺寸上会自动应用一些约束，表 4-17 概述了这些约束，当它们<0.0 则约束满足。

表 4-17　PBARL 约束类型

Section Type 截面类型	Constraint 约束	Section Type 截面类型	Constraint 约束
TUBE	DIM2 – DIM1	Z	DIM3 – DIM4
I	DIM4 – DIM2	CHAN2	DIM2 – DIM3
	DIM4 – DIM3		2 × DIM1 – DIM4
	DIM5 + DIM6 – DIM1	T2	DIM4 – DIM1
CHAN	2 × DIM4 – DIM2		DIM3 – DIM2
	DIM3 – DIM1	BOX1	DIM4 + DIM3 – DIM2
T	DIM3 – DIM2		DIM5 + DIM6 – DIM1
	DIM4 – DIM1	HEXA	2 ×DIM1 – DIM2
BOX	DIM4 – DIM1	HAT	2 × DIM2 – DIM1
	DIM3 – DIM2		2 × DIM2 – DIM3
CROSS	DIM4 – DIM3	L	DIM3 – DIM2
H	DIM4 – DIM3		DIM4 – DIM1
T1	DIM4 – DIM1	HAT1	DIM3 – DIM1
I1	DIM3 – DIM4		2 × DIM4 – DIM2
CHAN1	DIM3 – DIM4		2 ×DIM4 + DIM5 – DIM2

4.5.4　DVPREL2 卡片

DVPREL2 卡片用于将用户给定的方程关联到设计变量与分析模型属性。

通过 DEQATN 卡片定义的方程，关联设计变量与分析模型属性。方程输入值应用 DESVAR 卡片的数值，以及 DTABLE 卡片定义的常量值。DVPREL2 卡片格式，如表 4-18 所示。

表 4-18　DVPREL2 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DVPREL2	ID	TYPE	PID	PNAME/FID			EQID		
	DESVAR	DVID1	DVID2	DVID3	DVID4	DVID5	DVID6	DVID7	
		DVID8	DVID9	etc.					
	DTABLE	LABL1	LABL2	LABL3	LABL4	LABL5	LABL6	LABL7	
		LABL8	etc.						

通过 PBAR 卡片，定义了一个矩形杆的宽度 *W* 和深度 *D*。PBAR 卡片上需要的域，I1 和 I2 都和宽度、深度相关，这些都是方程中引用的设计变量。卡片格式如表 4-19 所示。

表 4-19　卡片格式示例 1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DVPREL2	201	PBAR	1	4			101		
	DESVAR	5	6						
DVPREL2	203	PBAR	1	5			102		
	DESVAR	5	6						
DVPREL2	204	PBAR	1	6			103		
	DESVAR	5	6						

下一个例子与上述示例相同。另外，它定义了 PNAME。卡片格式如表 4-20 所示。

表 4-20　卡片格式示例 2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DVPREL2	201	PBAR	1	A			101		
	DESVAR	5	6						
DVPREL2	203	PBAR	1	I1			102		
	DESVAR	5	6						
DVPREL2	204	PBAR	1	I2			103		
	DESVAR	5	6						

上述示例相关卡片如表 4-21 所示。

表 4-21　示例相关卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DESVAR	5	*W*	6.0	1.0	10.0				
DESVAR	6	*D*	5.0	1.0	20.0				
DEQATN	101	AREA（*W*,*D*) = *W***D*							
DEQATN	102	I1（*W*,*D*) = （*W***D***3)/12							
DEQATN	103	I2（*W*,*D*) = （*D***W***3)/12							
PBAR	1	222	0.1	19e-4	1e-3				

DVPREL2 卡片关键字的解释如表 4-22 所示。

表 4-22　DVPREL2 关键字解释

Field 域	Contents 内容
ID	关联标识号。对于其他 DVPREL1 卡片 ID 必须是唯一的 无默认值（整型>0）
TYPE	将要被关联的属性类型　（见DVPREL - Types） 无默认值（字符）
PID	属性标识号。当 PTYPE 为 PCOMPG 时，G#会在#为 GPLYID 的地方被使用。当 PTYPE 为 PCOMPP 时，P#会在#为 PLY ID 的地方被使用，见注释 5 无默认值（整型>0）

（续）

Field 域	Contents 内容
PNAME/ FID	属性名称，如“A”或“T”（正如在属性卡片的文档中所说的一样），或者在属性卡中的域号码。对于 PSHELL 属性 12I/T3 来说，只有域号码（6）是允许的。对于 PBARL 和 PBEAML 只有属性名称是允许的，不同部分使用不同域 无默认（字符或整型>0）
EQID	DEQATN 数据的方程 ID 无默认值（整型>0）
DESVAR	DESVAR 标记，指示跟随的 DESVAR ID 号
DVIDi	DESVAR ID 无默认值（整型>0）
DTABLE	DTABLE 标记，指示跟随的 DTABLE 标签
LABLi	DTABLE 卡片的常量标签 无默认值（字符）

DVPREL2 卡片关键字的更多解释如下：

（1）类型不能为 PSOLID

（2）当类型为 PBARL 或 PBEAML 时，用户应密切注意变量的变化范围，以避免无效的尺寸。

（3）具有多截面定义的 PBEAML 将不会被 DVPREL1 引用。

（4）PBARL/PBEAML 的属性将通过 DIMs（也就是不能被直接控制）来控制，除了 NSM。

（5）当类型为 PCOMPG 时，任一全局层或属性特有层会被选择。选择属性特有层时，该格式域与其他属性类型所使用的类似，在 PID 域内输入了 PCOMPG 的属性标识码，然后使用 PNAME 或 FID 来鉴定将要被关联的数值。在这个方案下，只有在 PID 域下给定 ID 的属性受到影响。选择全局层时，G#在 PID 域输入，#是全局层的 GPLYID。在此情况下，FID 是不适用的，因此 T 或者 THETA 被用在 PNAME 域来各自关联厚度或者方向。在这个方案下，所有使用给定 GPLYID 的均受到影响。当 TYPE 为 PCOMPP 时，P#在 PID 域中输入，#是 PLY 实体 ID。在此情况下，FID 是不适用的，因此 T 或者 THETA 在 PNAME 域中用来各自关联厚度或者方向。

4.5.5 DEQATN 卡片

OptiStruct 提供 DEQATN 卡片用于集成各种工程算法到尺寸优化模型中，该卡片可以对各种性能响应进行组合，并将响应作为设计目标或者设计约束。除了常规的数学运算符号，DEQATN 还支持表 4-23 所列的数学函数。

表 4-23 DEQATN 支持的数学函数

函数名	含义	公式
SUM	求和	$\mathrm{SUM}(y_1, y_2, \cdots, y_m) = \sum_{i=1}^{m} y_i$
AVG	求平均值	$\mathrm{AVG}(y_1, y_2, \cdots, y_m) = \left[\sum_{i=1}^{m} y_i\right] lm$
SSQ	求平方和	$\mathrm{SSQ}(y_1, y_2, \cdots, y_m) = \sum_{i=1}^{m} y_u^2$
RSS	求平方和的开方	$\mathrm{RSS}(y_1, y_2, \cdots, y_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} y_i^2}$
MAX	最大值	
MIN	最小值	
SUMABS	绝对值求和	$\mathrm{SUM}(y_1, y_2, \cdots, y_m) = \sum_{i=1}^{m} \lvert y_i \rvert$
AVGABS	绝对值平均值	$\mathrm{AVG}(y_1, y_2, \cdots, y_m) = \left[\sum_{i=1}^{m} \lvert y_i \rvert\right] / m$
MAXABS	绝对值最大值	
MINABS	绝对值最小值	

4.6 小结

尺寸优化技术的应用非常广泛，特别是对于很多成熟的产品，或者已经进入详细设计阶段的产品，通过概念设计实现创新设计的实施难度较大，而进行尺寸或参数方面的调整则可以起到立竿见影的效果，如提升性能或者减轻重量等。

尺寸优化的成功应用，需正确理解各尺寸变量之间的关系，通过各种数学表达式和内外部函数，对优化变量和响应函数进行正确的定义和约束。此外，在实际工程项目中，工况条件较多，需要注意不同工况下的设计约束。

如果优化问题是一个多学科的尺寸优化问题，有些工况 OptiStruct 不支持，则可以通过 HyperStudy 调用不同的学科求解器进行优化设计。

第 5 章

形状优化技术



形状优化技术通过将网格节点移动或者变形到某个新的位置，相当于改变零部件的CAD 设计，从而提高零部件的性能，如提高刚度、模态，减低应力集中等。根据网格节点变形的方式，可以分为以下两种：

- 基于手工建立网格变形的形状优化技术。用户需要利用 HyperMorph 模块，根据可行设计空间和工程经验等，对网格进行可能有助于提高性能的变形，然后通过 OptiStruct 优化确定变形的最佳位置。
- 基于边界节点自由变形的自由形状优化技术。用户不需要手工对网格进行变形，只需选择边界节点集（如边上的节点或者表面节点），设定边界节点变形方式，然后通过 OptiStruct 优化自动确定具有最佳性能的边界形状（内部节点会进行自适应变形从而减少单元扭曲）。

本章通过 4 个实例演示形状优化技术的应用操作过程，并通过对 SHAPE 和 DVGRID 卡片的解释帮助读者深入了解形状优化技术的方法。

本章重点知识

5.1　实例：考虑结构屈曲的钢轨形状优化
5.2　实例：带制造工艺约束的自由形状优化
5.3　实例：基于全局搜索算法的筋条形状优化
5.4　形状优化卡片
5.5　小结

5.1 实例：考虑结构屈曲的钢轨形状优化

某些载荷组合会使得结构变得不稳定而且发生挠曲，从而发生屈曲变形。当载荷达到一个临界值，即使载荷大小不再增加，结构也会不断发生变形。产生屈曲变形的临界载荷是由临界抗弯系数和所施加的载荷共同决定的。一般来说，最低的屈曲临界载荷是工程师最关心的，因为结构一旦承受比这个载荷更高的载荷，就会失效。

本实例会进行一个钢轨结构的尺寸和形状优化，来提高抗弯系数，从而在给定载荷下不发生屈曲，并且满足应力要求。这根钢轨的一端施加恒定的作用力，另一端全自由度约束，如图 5-1 所示。通过优化，可以提高抗弯系数，从而提高临界屈曲载荷。

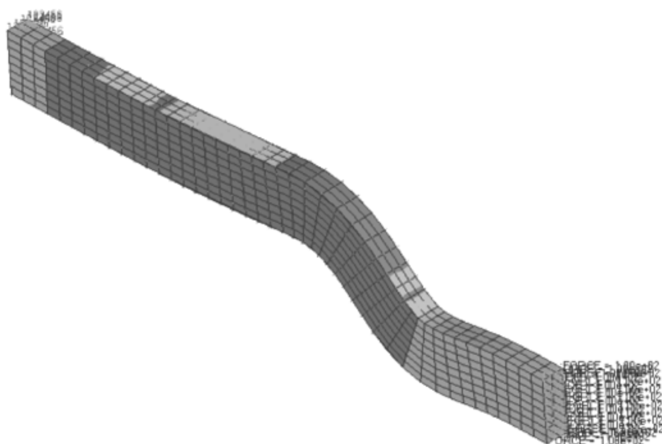


图 5-1 钢轨有限元模型

在本模型中，已经用 HyperMorph 进行了形状优化的预先定义，所以用户不必进行形状变化和形状变量的设定。尺寸优化也是本实例的一部分，最终优化后的结构变得更厚、更宽。

问题描述：对钢轨结构进行尺寸和形状优化来防止发生屈曲变形。

✓ 设计目标：最大 von Mises 应力最小化。

✓ 设计约束：

（1）将一阶屈曲系数提高到 30。

（2）设计区域的体积小于 800 000。

✓ 设计变量：单元厚度和形状变化。

在本实例中，将学习以下内容：

✓ 设置屈曲优化分析。

✓ 使用 HyperView 进行结果后处理。

STEP 01 启动 HyperMesh，设置 UserProfile，读取文件

（1）启动 HyperMesh Desktop。

（2）在 User Profile 对话框中选择 OptiStruct，单击 OK 按钮。

（3）在工具栏的 File 菜单中，选择 Open 中的 Model。

（4）选择 os_buckle_original.hm 文件，该文件的路径在 HyperWorks 安装目录下的 /tutorials/hwsolvers/optistruct/文件夹内。

（5）单击 Open。

os_buckle_original.hm 文件数据替代了之前的数据，在当前 HyperMesh 中载入。

STEP 02 查看之前定义的形状设计变量和形状变化动画

文件中的形状优化已经通过 HyperMorph 预定义了。用户将会查看之前定义的形状变化设计变量和形状变化动画。

（1）在模型浏览器中单击 Utility。

（2）如果 Utility 在 HyperMesh 的左侧用户界面中没有显示，则可以通过单击 View 菜单中的 Utility Menu。

（3）在 Utility 标签中，选择 Opti。

（4）在 Optimization Info 中，单击 Design Variables。

（5）出现 Size and Shape Design Variables 对话框。

（6）V1 和 V2 已经预先定义，Lower Bound 为−2.0，Initial Value 为 0.0，Upper Bound 为 2.0，如图 5-2 所示。

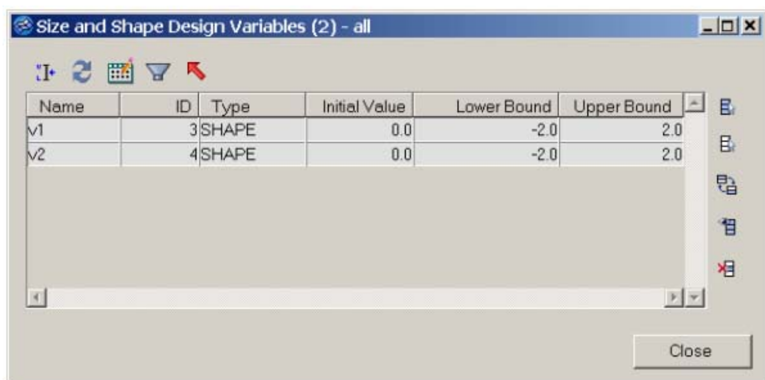


图 5-2　查看形状变量

（7）单击 Close 按钮，关闭 Size and Shape Design Variables 窗口。

（8）在 Analysis 页面下，单击 optimization。

（9）单击 shape。

（10）将选择按钮切换到 desvar，单击 animate。

（11）设置 simulation =为 SHAPE - sh1（1）。

（12）设置 data type =为 Perturbation Vector。

（13）单击 linear，观察第一个形状的变化。

（14）重复步骤（7）～（9）查看第二个形状变化，设置 simulation =为 SHAPE-sh2（2）。

（15）单击 return 按钮 3 次，回到 optimization 面板。

STEP 03 定义尺寸优化设计变量

形状优化设置已经在 os_buckle_original.hm 文件中预先定义，因此只需定义尺寸设计变量就可以了。

（1）在 optimization 面板中，选择 gauge 面板。
（2）确认在左边的单选框中选择的是 creat 子面板。
（3）单击 desvar=，输入 shells。
（4）单击 props。
（5）同时单击 dom 和 shell_elements。
（6）单击 select。
（7）将 type 切换至 PSHELL-T，并切换到 same desvar for all props。
（8）将 initial value =赋值为 6.0。
（9）单击第一个切换键将 lower bound % =切换到 lower bound，并赋值为 3.0。
（10）单击第二个切换键将 upper bound % =切换到 upper bound，并赋值为 9.0。
（11）单击 Create 按钮。
（12）单击 return 按钮两次，返回主菜单。

STEP 04 创建特征频率分析（屈曲）载荷集合器（load collector）

（1）创建一个 load collector 进行实际特征频率分析（屈曲分析）。
（2）选择 Load Collectors 按钮 。
（3）在面板左侧的单选框中选择 create 子面板。
（4）单击 loadcol name =，输入 buckling。
（5）单击 card image =，选择 EIGRL。
（6）单击 create/edit。
（7）设置 V1 =0.01，V2 =100.0，ND =20。
（8）单击输入框中输入一个数字，在卡片中输入一个数值域。
（9）OptiStruct 会在 100 以下寻找 3 个最小的特征频率。
（10）单击 return 按钮两次回到主菜单。

STEP 05 设置屈曲优化载荷步

（1）在 Analysis 页下，单击 loadsteps。
（2）单击 name =，输入 buckling。
（3）单击 type，在弹出的菜单中选择 linear buckling。
（4）单击 STATSUB，选择 LINEAR（已经在静态载荷工况中存在）。

（5）单击 METHOD（STRUCT），选择 buckling。

（6）单击 create 按钮和 return 按钮，返回主菜单。

STEP 06 定义优化响应

（1）在 Analysis 页面下，选择 optimization。

（2）单击 responses。

（3）按如表 5-1 所示的设置创建 3 个响应。

表 5-1　响应信息

响 应 名 称	响 应 类 型	选　　项
Buckle	buckling	Mode Number 选择 1
Von	static stress	Props 选择 dom；Stress type 选择 von mises/both surfaces
Vol	volume	Props 选择 dom

（4）单击 return 按钮。

STEP 07 定义优化约束

（1）在 optimization 面板下，单击 dconstraints。

（2）选择 constraint =，输入 BUCKLE。

（3）单击左侧的 lower bound 中输入 30。

（4）单击 response =，单击选择 Buckle。

（5）单击 loadsteps，勾选 Buckling，并单击 select。

（6）单击 Create 按钮。

（7）设置 constraint =VOL，response =Vol。

（8）勾选 lower bound，并单击 upper bound 左侧的选框，赋值为 800 000。

（9）单击 Create 按钮。

（10）单击 return 按钮，返回 optimization 面板。

STEP 08 定义最小化最大值优化响应

（1）单击 obj reference.

（2）选择 dobjref =，输入名称为 MAX_STRESS。

（3）勾选 pos reference =，输入数值为 1.000。

（4）单击 response =，并选择 Von。

（5）切换 all 为 loadsteps。

（6）单击 loadsteps。

（7）单击 LINEAR 左侧的选框，单击 select。

（8）单击 Create 按钮。

这样就创建了最小化最大值优化响应。

（9）单击 return 按钮。

STEP 09 定义优化目标

（1）单击 objective。

（2）单击切换键，设定为 minmax。

（3）单击 dobjrefs。

（4）确认 MAX_STRESS 左边的选框已勾选。

（5）单击 select。

（6）单击 create 按钮。

（7）单击 return 按钮两次，回到主菜单。

STEP 10 提交屈曲优化问题求解

（1）在 Analysis 页，选择 OptiStruct 面板。

（2）单击 save as。

（3）选择将写入的 OptiStruct 模型的路径，并在 File name 文本框中输入文件名 os_buckle_ optimization.fem。

（4）以.fem 作为扩展名的文件是 OptiStruct 的运算输入文件。

（5）单击 Save 按钮。

（6）注意到 os_buckle_optimization.fem 文件的文件名和路径显示在 input file 域中。

（7）设置 memory options 为 memory default。

（8）单击 run options 切换并选择为 optimization。

（9）设置 export options 为 all。

（10）单击 OptiStruct。

这样就把输入文件提交到 OptiStruct，并开始优化计算。如果计算成功，新的结果文件将在 OptiStruct 模型所在目录中看到。如果计算出错，os_buckle_optimization.out 文件可以有效地帮助用户查看错误信息，并调试输入文件。

STEP 11 在 HyperView 中观看动画

（1）在 OptiStruct 面板下单击 HyperView 按钮。

（2）关闭 Message Log 窗口。

（3）在工具栏上的 Graphics 菜单中选择 Select Load Case。

（4）选择 Design 和 Iteration3。

（5）单击 Contour 面板中的“工具条”按钮。

（6）在 Result type 下，在第一个下拉列表中选择 Shape Change (v)，在第二个列表中选

择 Mag。

（7）单击 Apply。

（8）动画播放时，利用滑动速度滚动条可以调整动画速度。

（9）单击搜索条边的 Animation Controls 按钮，激活 Bounce 选项来查看变形前后的过程。

（10）停止动画，使用 Current time 滚动条手动控制动画。

STEP 12 查看最终形状的应力

（1）单击 Next Page 箭头到下一页，该页显示了分析结果。

（2）单击 Contour 面板中的“工具条”按钮。

（3）在 Result type 下，从第一个下拉列表中选择 Element Stresses （2D&3D）(t)，从第二个列表中选择 vonMises。

（4）在工具条上的 Graphics 菜单，选择 Select Load Case。

（5）单击 Design，选择 Iteration3。

（6）单击 Apply。

最终变形形状的应力云图将在屏幕上显示。

STEP 13 查看屈曲频率

（1）单击 Next Page 箭头到下一页，该页显示了屈曲变形结果。

（2）选择 animation mode 按钮，前往 Modal。

（3）单击 Animation Controls 按钮。

（4）在动画播放时，使用速度条滚动条可以调整动画速度。

（5）提高变形显示比例，以便更好地观察屈曲模态形状变化。

（6）激活 Bounce 选项，以便观察变形。

（7）停止动画，使用 Current time 滚动条手动控制动画。

（8）单击状态栏，激活 Load Case and Simulation Selection 对话框 Iteration 0 Subcase 3 (Buckl 1。如图 5-3 所示，可以看到屈曲模态以及特征频率。

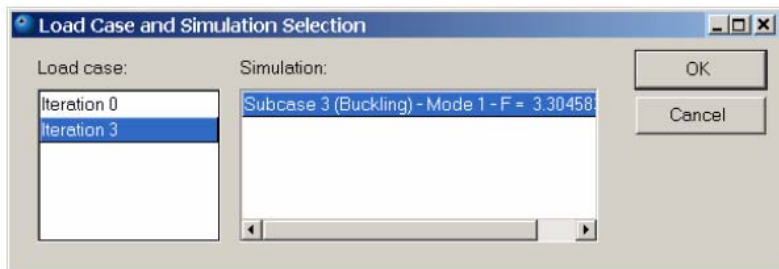


图 5-3　迭代步选择

5.2 实例：带制造工艺约束的自由形状优化

本实例将考虑工艺约束（例如对称性及网格界限约束），对如图 5-4 所示的模型进行自由形状优化。优化目标是通过改变几何特征降低应力。

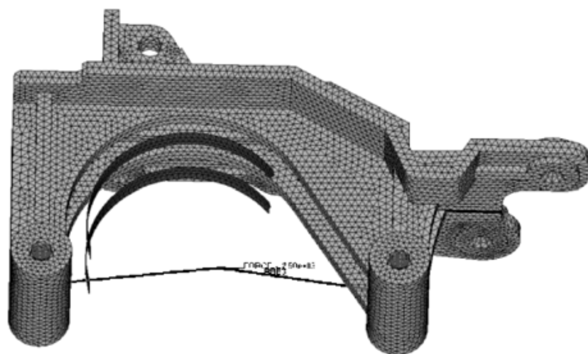


图 5-4 有限元优化模型

在本实例中，将学习以下内容：

✓ 设置带有工艺约束的自由形状优化问题。

✓ 在 HyperView 中进行自由形状优化结果后处理。

STEP 01 启动 HyperMesh Desktop，设置 User Profile，打开模型文件

（1）启动 HyperMesh Desktop。

（2）在 User Profile 对话框中选择 OptiStruct，单击 OK 按钮。

（3）这样就加载了 RADIOSS/Bulk 和 OptiStruct 所对应的 HyperMesh 设置。

（4）User Profiles 也可以通过工具条的 Preferences 下拉菜单进入。

（5）在 File 菜单下，选择 Open 中的 Model。

选择 freeshape3d_mfg.hm 文件，该文件路径在 HyperWorks 安装路径下/tutorials/hwsolvers/optistruct/文件夹内。

（6）单击 Open。

freeshape3D_mfg.hm 文件数据替代了之前的数据，在当前 HyperMesh 中载入。注意到文件 freeshape3D_mfg.hm 的位置在 file 域中显示。

STEP 02 创建自由形状设计变量(DSHAPE Cards)

（1）在 Analysis 页面下，单击 optimization。

（2）单击 free shape。

（3）在 Create 子面板中，单击 desvar=，并输入 shape。

（4）单击 nodes 选择 by sets，勾选 shape_nodes。

（5）单击 select，被选中的节点如图 5-5 所示。

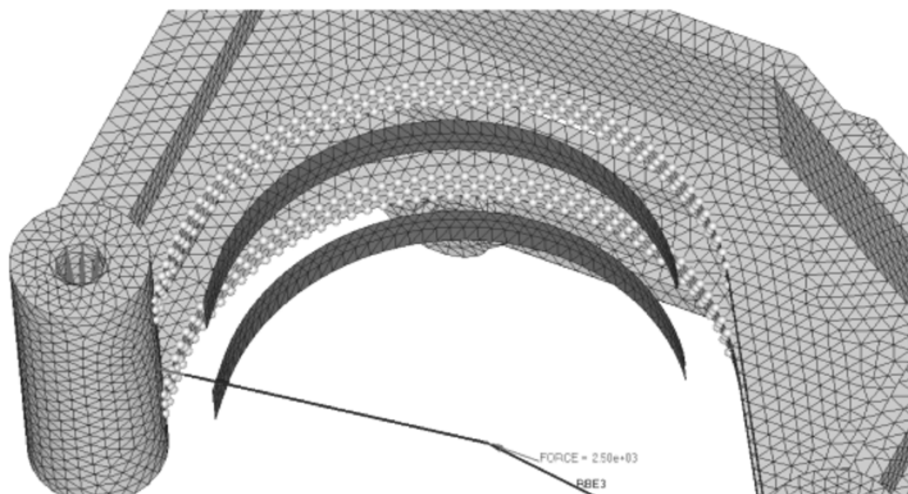


图 5-5　自由形状设计空间

（6）单击 Create 按钮。
（7）单击 parameters 子面板选择 grow 作为 direction。
（8）设置 mvfactor=为 0.5。
（9）设置 nsmooth 为 10 并单击 update。
（10）单击 return 按钮两次，返回面板。

STEP 03 转换当前壳单元创建网格界限面(BMFACE)

（1）进入 2D 页面。
（2）进入 elem types 面板。
（3）单击 elems 进入扩展菜单。
（4）选择 by collector。
（5）激活 barrier。
（6）在 2D & 3D 子面板下，单击 tria3 旁边的 CTRIA3。
（7）从选项列表中选择 BMFACE。
（8）单击 quad4 旁边的 CQUAD4。
（9）从选项列表中选择 BMFACE。
（10）单击 update。

STEP 04 定义 1-Plane 对称约束

自由形状优化技术支持的制造工艺约束包括拔模方向约束、挤压约束、1-Plane 对称约束、最大扩大/缩小距离控制、侧向约束和网格界限约束。

（1）在 Analysis 页下，单击 optimization。

（2）单击 free shape，确认 desvar 的选择为 shape。

（3）在 free shape 面板中单击 pattern grouping。

（4）选择 pattern type 为 1-pln sym。

在自由形状优化中，1-平面对称约束将会生成对称的设计，并且忽略初始网格、边界条件和载荷的设置。对称面的设定是由初始点和固定点构成的，对称面将会垂直于初始点和固定点连线方向向量并且通过固定点，如图 5-6 所示。

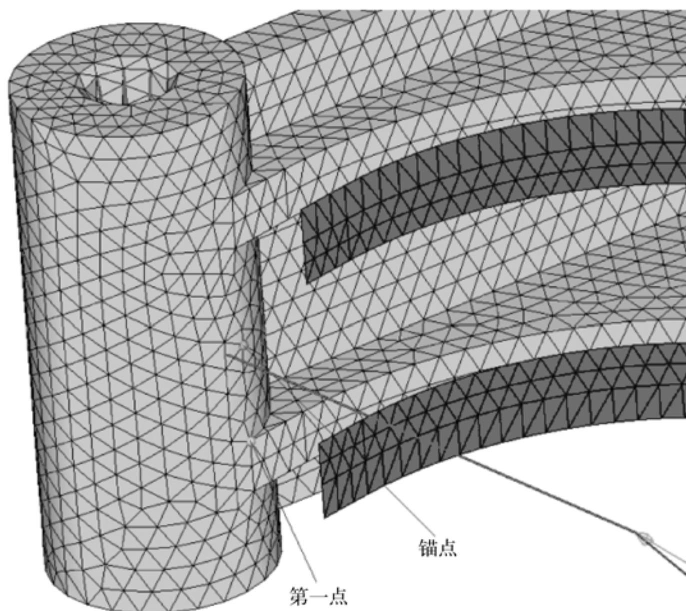


图 5-6　定义 1-plane 对称

（5）单击 anchor node，输入 node id=1，并按〈Enter〉键。这样就选择了 ID 为 1 的节点。

（6）单击 first node 并输入 node id=2。这样就选择了 ID 为 2 的节点。

（7）单击 update 按钮更新设计变量。

这样就完成了对称性约束的定义。

STEP 05 定义网格界限（sidecon）约束

网格界限约束控制了设计边界或设计表面的总体变形程度；网格界限约束了设计边界或设计表面在一个限制的设计空间内变形，控制变形绝不穿过边界。

网格界限应该由壳单元构成，并且使用尽可能少的网格数量。

在本实例中，网格界限已经创建完成，组件名为 barrier，如图 5-7 所示。

（1）在 free shape 面板下单击 sidecon。

（2）单击 desvar =并选择 shape。

（3）单击 Barrier mesh：component=并从列表中选择 barrier。
（4）单击 update。
（5）单击 return 按钮，返回主菜单。

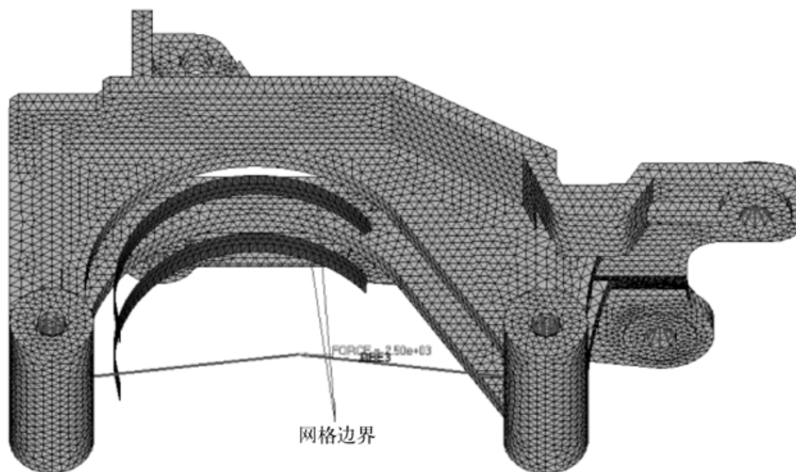


图 5-7 设置 Mesh Barrier

STEP 06 定义优化响应

（1）单击 responses 面板。
（2）在 response=域中输入 Stress。
（3）设置响应类型为 static stress。
（4）切换 props 为 elems。
（5）单击 elems 按钮并单击 by sets。
（6）激活 stress 并单击 select。
（7）选择 von mises 并单击 Create 按钮。
（8）单击 response= 并选择 mass。
（9）设置 response type 为 mass。
（10）单击 Create 按钮。
（11）单击 return 按钮，返回 optimization 面板。

STEP 07 定义优化约束

（1）选择 dconstraints 面板。
（2）单击 constraint=并输入名称为 stress。
（3）单击 response=选择 stress。
（4）激活 upper bound =并赋值为 62。
（5）单击 loadsteps，激活 ls2，并单击 select。

（6）单击 Create 按钮。

（7）单击 return 按钮。

STEP 08 定义目标函数

（1）选择 objective 面板。

（2）单击最左边的切换按钮并选择 min。

（3）单击 response=并选择 mass。

（4）单击 Create 按钮。

（5）单击 return 按钮两次，返回主菜单。

STEP 09 定义 SHAPE 卡片

默认情况下只有位移和应力结果在_s#.h3d 文件中是可用的。在 HyperView 打开的模型文件中，如果要查看形状变化之外的应力结果，必须定义一个 SHAPE 卡片。

（1）在 Analysis 页面下，选择 control cards 面板。

（2）单击 next 按钮 3 次并选择 SHAPE。

（3）设置 format 为 h3d，并且将 TYPE 和 OPTION 设置为 ALL。

（4）单击 return 按钮两次，返回主菜单。

STEP 10 启动 OptiStruct

（1）在 Analysis 页面下单击 OptiStruct。

（2）单击在 input file 后的 save as 按钮。

（3）在 File name 域内选择用户想要保存的 OptiStruct 模型文件的路径并输入文件名，freeshape3d_mfgopt.fem。

（4）单击 Save 按钮。

（5）注意 freeshape3d_mfgopt.fem 文件的文件名和路径显示在 input file 域内。

（6）设置 export options 为 all。

（7）单击 run options 切换开关并选择 optimization。

（8）设置 memory options 为 memory default。

（9）单击 OptiStruct。

这样就会在一个 DOS 窗口中启动 OptiStruct 计算。

如果优化成功，将不会有错误信息显示；当在窗口显示 Processing complete，说明优化成功。

下面介绍如何在 HyperView 中对结果进行后处理，HyperView 可以通过 OptiStruct 面板进入。

HyperView 是一个完整的后处理以及有限元（FEA）环境模拟，多体系统模拟、视频以及工程数据集成软件。

STEP 11 查看形状结果

（1）在 Analysis 页面的 OptiStruct 面板下，单击 HyperView 按钮。

注意到弹出一个消息窗口提示 freeshape3d_mfgopt_des.h3d 和 freeshape3d_mfgopt_s4.h3d 已经打开。

（2）单击 Close 按钮关闭窗口。

（3）freeshape3d_mfgopt_des.h3d 将被显示在 HyperView 的第一页。freeshape3d_mfgopt_s4.h3d 将被显示在 HyperView 的第二页。

（4）单击箭头进入第二页。

（5）从 Graphics 菜单中单击 Select Load Case。这样就会打开 Load Case and Simulation Selection 对话框，也可以通过状态栏的右下角按钮进入。

（6）在 Simulation 下选择 Iteration14（载入最终迭代步结果）。

（7）单击 OK 按钮。

（8）进入 Deformed面板。

（9）设置 Result type 为 Shape change(v)。

（10）单击 Apply。

形状优化结果应用于模型。

STEP 12 查看形状优化模型的应力云图

（1）进入 Contour 面板，在 Result type 中选择 Element Stresses (2D & 3D) (t)。

（2）选择 von Mises 作为 stress type。

（3）单击 Elements，选择 By set，并选择 stress。

（4）单击 Add 并关闭。

（5）单击 Apply，应力云图如图 5-8 所示。

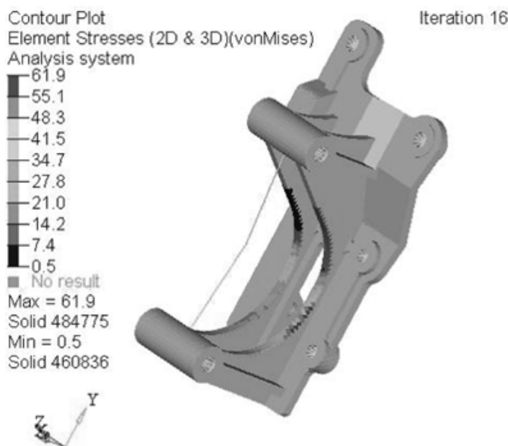


图 5-8　最终形状的 von Mises 应力云图

5.3 实例：基于全局搜索算法的筋条形状优化

本实例将使用全局搜索方法来生成多个优化起始点，进行形状优化。本实例的模型如图 5-9 所示，是由一个底板和交叉肋条构成的，受到一个随频率变化的载荷激励。优化目标是通过改变肋条的形状，提高结构刚度。

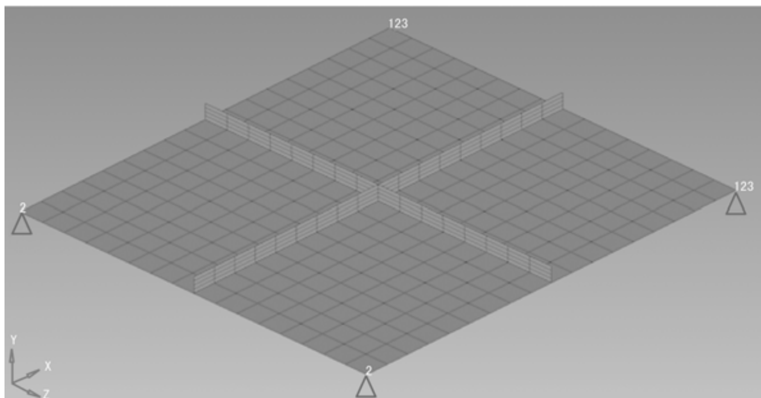


图 5-9　模型预览

在模型中已经定义了常规的形状优化。优化以下问题。

√ 设计变量：形状设计变量。

√ 设计目标：激励载荷作用节点的最大位移最小化（minmax）。

√ 设计约束：质量< 2.0e-3。

STEP 01 载入 OptiStruct user profile，读取文件

（1）启动 HyperMesh Desktop。

（2）在 User Profile 对话框中选择 OptiStruct。

（3）单击 OK 按钮。

这样就加载了 RADIOSS/Bulk 和 Optistruct 所对应的 Hypermesh 设置。

User Profiles 也可以通过工具栏上的 Preferences 下拉菜单进入。

（4）在 File 菜单中选择 Import 中的 Solver Deck。

（5）设置 File type 为 OptiStruct。

（6）在 File 域中单击按钮，将会弹出一个 OptiStruct 文件选择浏览框。

（7）选择 rib_opt.fem 文件，该文件位于 HyperWorks 安装路径下/tutorials/hwsolvers/optistruct/文件夹内。

（8）单击 Open 按钮。

rib_opt.fem 文件的路径在 file 域中显示。

（9）单击 Apply。

rib_opt.fem 数据已经在当前 HyperMesh 中载入。

（10）单击 Close 按钮关闭消息框。

STEP 02 检查模型和优化设置

（1）使用 Model Browser 来检查模型、载荷步和优化设置。Model Browser 位于 HyperMesh 窗口的左边，如图 5-10 所示。

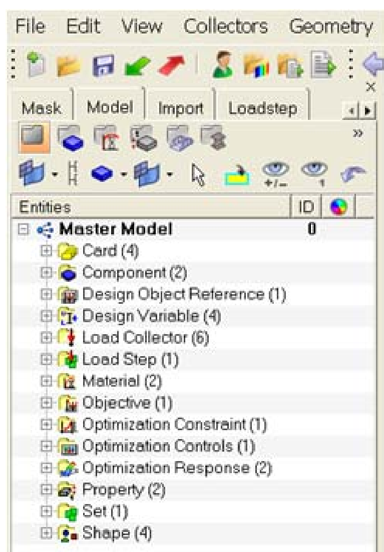


图 5-10　查看模型信息

（2）单击 optimization 面板的 shape 来检查形状设计变量。
（3）单击 animate 进入 Deformed Shape 面板。
（4）模型的某一个形状将会在 simulation=中显示。
（5）单击 linear，将会看到该形状的动画。
（6）用户可以通过单击 next 或 prev 按钮来查看其他动画。
（7）返回 optimization 面板。

STEP 03 提交工作

（1）在 Analysis 页面下，进入 OptiStruct 面板。
（2）rib_opt.fem 文件的名称和路径在 file 域中显示。模型文件和结果文件的存放路径是可以更改的。
（3）单击 OptiStruct。
模拟运行结束后，前往 rib_opt.out 文件保存路径打开文件。检查优化历史和最终优化设计方案。
（4）返回 Analysis 页面。

STEP 04 为全局搜索定义 DGLOBAL 卡片

（1）在 Analysis 页面下，单击 control cards。
（2）单击 CTRL_UNSUPPORTED_CARDS，并输入 DGLOBAL=1。
（3）单击 BULK_UNSUPPORTED_CARDS，并输入 DGLOBAL=1。
（4）单击 return 按钮。
（5）在默认参数下，工况和批量数据录入的全局搜索设置完成。

STEP 05 提交工作

（1）在 Analysis 页面下，选择 OptiStruct 面板。
（2）在 input file 域后，单击 save as。
（3）将弹出 Save file 对话框。
（4）选择想保存 OptiStruct 文件的路径，并在 File name 域中输入文件名，rib_opt_global.fem。
（5）以.fem 作为扩展名的文件是 OptiStruct 的运算输入文件。
（6）单击 Save 按钮。
（7）注意 rib_opt_global.fem 文件的文件名和路径都显示在 input file 域中。
（8）单击 OptiStruct。

OptiStruct 优化计算开始。如果计算成功，新的结果文件将在 OptiStruct 模型所在目录中看到；如果计算出错，rib_opt_global.out 文件可以有效地帮助用户查看错误信息，并调试输入文件。在查看结果文件之前，确保这一步骤已经完成。

STEP 06 GSO 结果文件后处理

使用 GSO 的默认参数设置后，OptiStruct 自动决定了起始点的数量和设计变量的组数。

（1）打开 rib_opt_global.out 文件。

GSO 模拟的总体概要在输出文件的最后输出。该 GSO 模拟由 20 个起始点完成。找到了 18 个唯一的设计，这意味着有两个重复的设计。在起始点 11 找到了最佳的设计方案。所有设计的信息表格也被列出，包括起始点信息、目标函数、约束冲突、时间和路径扩展名。

（2）将最佳设计结果与常规优化方法（第三步）结果进行比较。

在工作目录下，创建了 18 个带有“_GSO_V1_V2”扩展名的路径。V1 是起始点的编号，V2 是所有唯一设计中该设计的排名。每一个起始点的优化结果可以在路径中分别找到。

（3）打开 Excel 文件 rib_opt_global_GSO.slk。

唯一设计和所有设计的信息都在 Excel 文件中列出。GSO 模拟的最佳设计在第 11 个起始点达到，该设计的所有结果都储存在 rib_opt_global_ GSO_11_1 路径下，在全局搜索中，该设计被找到两次。在 GSO 搜索中，如果两个设计的差别在唯一设计容差以下，就认为它们是同一个设计；比如起始点 11 和 3 的两个设计。该信息可以在全部设计表中找到。每次

模拟的统计信息和优化设计变量也可以找到。

STEP 07 在 HyperView 中对最优设计进行后处理

下面展示了如何通过 HyperView 查看 GSO 的最佳设计。

（1）通过单击 OptiStruct 面板下的 HyperView 按钮来启动 HyperView。

（2）通过 Load model and results 面板，在/rib_opt_global_GSO_11_1 路径下载入 the rib_opt_global_des.h3d 文件。

（3）单击 Apply。

（4）载入包含优化结果的.h3d 文件。

（5）确认在 Results Browser 选择了 Iteration 6。

（6）前往 Contour 面板，选择 Shape Change (v)作为 Results type，单击 Apply。

（7）最终迭代步下的优化形状如图 5-11 所示。

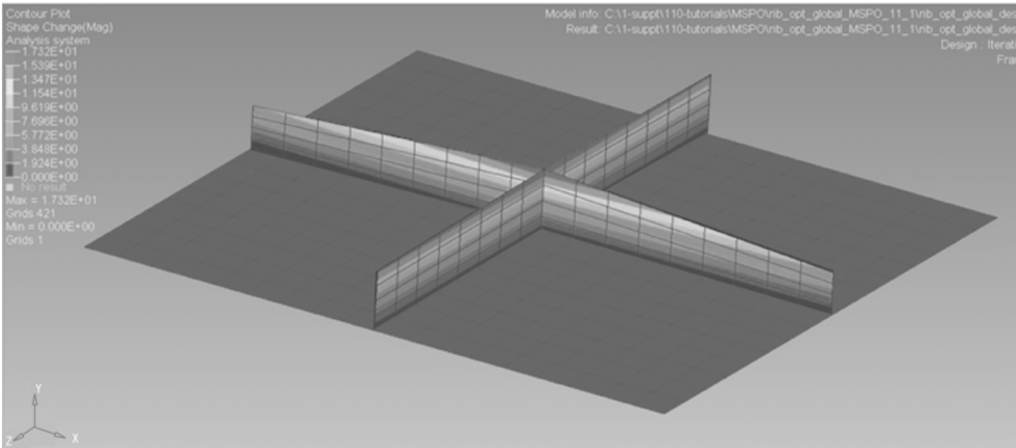


图 5-11　GSO 方法下的最佳形状优化设计

5.4　形状优化卡片

请先做完实例或者熟悉形状优化技术，然后查看卡片了解更多内容。

5.4.1　DSHAPE 卡片

DSHAPE 卡片定义自由形状优化设计变量和参数设置，其卡片格式如表 5-2 所示。

表 5-2　DSHAPE 卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DSHAPE	ID								
	PERT	DTYPE	MVFACTOR	NSMOOTH	MXSHRK	MXGROW	SMETHOD		

（续）

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
	GRID	GMETH	GSETID / GID1	GID2	GID3	GID4	GID5	GID6	
		GID7	GID8	…	…				
	PATRN	TYP	AID/XA	YA	ZA	FID/XF	YF	ZF	
	DRAW	DTYP	DAID/XDA	YDA	ZDA	DFID/XDF	YDF	ZDF	
	EXTR	ECID	XE	YE	ZE				
	GRIDCON	GCMETH	GCSETID1 / GDID1	CTYPE1	CID1	X1	Y1	Z1	
		GCMETH	GCSETID2 / GDID2	CTYPE2	CID2	X2	Y2	Z2	
		…	…						
	SDCON	SDCID1	XL1	XU1	YL1	YU1	ZL1	ZU1	
		SDCID2	XL2	XU2	YL2	YU2	ZL2	ZU2	
		…	…						
	BMESH	BMID							

DSHAPE 卡片关键字的解释如表 5-3 所示。

表 5-3　DSHAPE 关键字介绍

域	内　容
ID	每个 DSHAPE 卡片必须有个唯一的 ID 无默认值（整型> 0）
PERT	PERT 标志，提示扰动信息
DTYPE	指定了自由形状优化的方向类型。见注释 1 默认= BOTH （GROW，SHRINK，或 BOTH）
MVFACTOR	网格的最大移动系数。MVFACTOR 的单位是 GRID 定义的网格周边的平均网格尺寸 默认 ＝0.5（实数）
NSMOOTH	网格层数 默认 ＝10（整数）
MXSHRK	最大缩小距离 无默认值
MXGROW	最大扩大距离 无默认值
SMETHOD	网格平滑方法 默认= 1（1 或 2） 方法 1 比方法 2 快，但是方法 2 在避免网格畸变上有更好的稳健性
GRID	GRID 标志，指示了跟随的网格 ID 的列表。这些网格是自由形状优化的设计变量
GMETH	指示了一个网格列表将被一个网格 ID 列表或者一个单独的 SET 定义 默认= ID （SET 或 ID）
GID#	网格标识码。在 DSHAPE 卡片中定义的网格列表 无默认（整型> 0）
GSETID	网格 SET 识别码。一个网格集合，包含自由形状优化设计中的设计网格 无默认（整型> 0）
PATRN	PATRN 标志，提示变量模式对称被激活。会跟随模式对称的相关信息

（续）

域	内　容
TYP	变量模式对称类型。如果设置了对称面或者模式对称，则是必需的。现在仅支持 1-plane 对称（TYP=10） 默认= 0 （0 或 10）
AID/XA， YA， ZA	变量模式对称定位点。这些域定义了一个点，决定着网格是如何进行变量模式对称的（见注释 3）。*X*，*Y*，*Z* 的值是在全局坐标系下定义的。用户可以在 AID/XA 域输入网格 ID 来定义定位点 默认= 原点（在三个域中的实数或 AID/XA 域中的整数）
FID/XF， YF， ZF	变量模式对称的第一向量的方向。这些域定义了 *xyz* 向量，决定了网格是怎样进行模式对称的。（见注释 3）。*X*，*Y*，*Z* 的值是在全局坐标系下定义的。用户可以在 FID/XF 域输入网格 ID 来定义此向量。该向量方向从定位点到该网格。如果所有域是空白且 PATYP 不是空白或为 0，则 OptiStruct 会报错 无默认值
DRAW	DRAW 标志，指示了所定义的铸造约束。仅在 PTYPE = PSOLID 时有效。 如果 PTYPE 是其他值时，则 OptiStruct 会终止并报错
DTYP	拔模方向类型。 SINGLE 意味着会使用一个模具，模具在给定的拔模方向上取出
DAID/XDA， YDA， ZDA	拔模方向定位点。这些域定义了铸造拔模方向的定位点。该点可以通过在 DAID 域输入网格 ID 定义，也可以通过在 XDA，YDA 和 ZDA 域中输入 *X*，*Y*，*Z* 值来定义。这些坐标是在基准坐标系下的 默认= 原点（在 3 个域中的实数或第一个域中的整数）
DFID/XDF， YDF， ZDF	定义拔模方向的方向向量。这些域定义了一个点。向量方向从基准点到这个点。该点可以通过在 DFID 域输入网格 ID 定义，也可以通过在 XDF，YDF 和 ZDF 域中输入 *X*，*Y*，*Z* 值来定义。这些坐标是在基准坐标系下的 无默认（在 3 个域中的实数或第一个域中的整数）
SDCON#	SDCON#标志，提示应用了侧向约束
SDCID#	坐标系的 ID，决定了 XL#，XU#，YL#，YU#，ZL#，ZU# 部件
XL#，XU#， YL#，YU#，ZL#，ZU#	侧向约束是通过坐标的上下限定义的，该约束限制了设计区域网格的移动空间。任一域都可以是空白，这就意味着对应的坐标没有被约束
EXTR	EXTR 标志，提示应用了挤压约束。仅在 PTYPE = PSOLID 时有效。 如果 PTYPE 是其他值，则 OptiStruct 会终止并报错。
ECID	坐标系的 ID，决定了 *X*，*Y*，*Z* 部件 默认= 0（整型> 0） 对于自由形状 9.0，我们认为只有两种简单的挤压路径：线和圆 线：ECID 是一个矩形系统 圆：ECID 是一个圆柱形系统
XE， YE， ZE	当 ECID 是一个矩形系统，*X*，*Y*，*Z* 是 EID 系统下的向量部件，定义了挤压路径
GRIDCON	GRIDCON 标志，提示一系列网格会被约束关联起来 提示：在平滑区域的网格（由 NSMOOTH 定义），会在自由形状优化时移动，在不改变模型形状的情况下，以避免网格畸变。通过 GRIDCON 用户可以约束这些网格的移动，甚至在它们未在 GRID 后定义的情况下
GCMETH	指示了一个网格列表将被一个网格 ID 列表或者一个单独的 SET 定义 默认= ID（SET 或 ID）
GCSETID#	网格 SET 标识码。一些特定网格 SETs 的 Ids，约束在以一个预定的方式下移动 无默认（整型> 0）
GDID#	一些特定网格的 Ids，约束在以一个预定的方式下移动 无默认（整型> 0，ID 必须同样存在于 GRID 标志后的列表中）
CTYPE#	指定应用在网格 GDID#的约束类型（见注释 2） 无默认（FIXED，DIR，或 NORM）
CID#	坐标系的 ID，决定了 *X*，*Y*，*Z* 部件 默认= 0 （整型≥0）

（续）

域	内　容
X#， Y#， Z#	向量的 *X*，*Y*，*Z* 部件，定义了网格 GDID#的约束移动方向，或是定义了网格 GDID#约束平面的法向 默认 ＝0.0（实数）
BMESH	BMESH 标志，提示伴随了 BMFACE ID
BMID	BMFACE ID ，定义了一系列 QUADs 和/或 TRIAs，这些又定义了一个界限，使得在优化时设计面不会超出这个界限

DSHAPE 卡片关键字的更多解释如下。

（1）DTYPE 有 3 个特有的选项。

√ GROW：网格不能移动进入初始的部件边界。

√ SHRINK：网格不能移动出初始的部件边界。

√ BOTH：网格不受约束。

（2）CTYPE 有 3 个特有的选项。

√ FIXED：由于自由形状优化，网格不能移动。

√ DIR：网格被强制移动，沿着后续域中定义的方向。

√ NORM：网格被强制限制在一个平面，后续的域中定义了平面的法向。

（3）对于单一平面对称，（TYP=10），该平面定义为法向沿着向量，位置则位于定位点。

5.4.2　DVGRID 卡片

DSHAPE 卡片定义自由形状优化的设计变量和节点位置的关系，其卡片格式如表 5-4 所示，示例如表 5-5 所示。

表 5-4　DVGRID 卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DVGRID	DVID	GID	CID	COEFF	X	Y	Z		

表 5-5　DVGRID 卡片示例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
DVGRID	1	1032	0	1.0	1.0	0.0	0.0		

DVGRID 卡片关键字的解释如表 5-6 所示。

表 5-6　DVGRID 关键字介绍

DVID	DESVAR 标识号 (整型> 0)
GID	GRID 标识号 (整型> 0)
CID	坐标系标识号 (整型≥0，默认= 0)
COEFF	域 6,7,8 定义的向量的放大倍数
X, Y, Z	在 CID 定义的坐标系下，定义节点扰动的向量组件

DVGRID 卡片关键字的更多解释如下：

（1）零或空白的 CID 引用的基本坐标系。

（2）对于一个给定的节点，多次引用其节点 ID 将会导致形状向量的叠加。

（3）DVGRID 数据定义了在节点位置的扰动，更新的节点位置为

$$\text{location}_{\text{new}} = \text{location}_{\text{GRID}} + \sum_j coef_j \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_j [N]^{\text{T}}\, xDV_j$$

DV 为设计变量值，j 和$[N]^{\text{T}}$ 为基于 CID 和 GRID 位置的坐标变换矩阵。

5.5　小结

形状优化技术是一种用于产品详细设计阶段的技术，只能对产品结构进行有限的改动，主要用于改进局部结构减少应力集中、改变零件位置提高刚度等，不用于产品结构布局和减重设计等。

形状优化计算过程中有时会遇到网格畸变导致优化过程终止的问题。一般来讲，提高设计空间网格的质量，计算终止后对网格进行手工重新划分然后重新提交求解等，可以让 OptiStruct 进行更多优化迭代，从而找到更优设计。

第 6 章

复合材料优化技术



复合材料以其比强度、比模量高，耐腐蚀、抗疲劳等优点，在工业界得到了越来越多的应用。特别是在航空航天领域，由于钢铁和有色合金很难满足日趋苛刻的质量、力学等设计性能要求，复合材料更是得到了广泛的应用。波音 787 和空客 350 飞机的复合材料用量都超过 50%，同时也在研发过程中面临许多重大挑战，除了大量的小样件和部段试验件的试验测试，仿真优化技术也是解决各种技术难题，缩短研发周期的重要技术手段。

本章对 HyperWorks 复合材料仿真解决方案进行介绍，并通过 3 个实例演示了如何进行复合材料零部件的优化设计。

本章重点知识

6.1　HyperWorks 复合材料仿真解决方案
6.2　实例：复合材料自行车车架优化
6.3　实例：飞机水平尾翼优化
6.4　小结

6.1 HyperWorks 复合材料仿真解决方案

HyperWorks 软件包含 HyperMesh，RADIOSS，OptiStruct，HyperView 等模块，分别用于复合材料的建模，求解，优化，后处理，是全球领先的复合材料 CAE 仿真解决方案。

6.1.1 复合材料建模技术

HyperMesh 是目前世界上最著名的 CAE 前处理软件之一。它提供了无以伦比的建模功能和广泛的 CAD 和 CAE 软件接口。针对复合材料，HyperMesh 提供了专业的复合材料前处理模块 HyperLaminate，具有直观、便捷的用户界面（如图 6-1 所示），可以快速地对复合材料模型进行创建、检查和编辑，直观定义每一铺层的厚度、角度及材料属性（如纤维和基体），定义各种复合材料失效准则等。

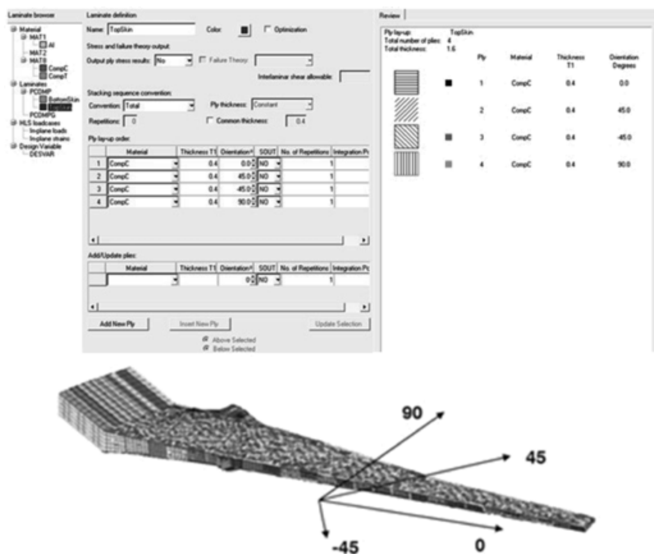


图 6-1　HyperLaminate 图形界面

HyperMesh 支持 Ply+Stack 的复合材料铺层定义方式，即定义出各种复合材料物理铺层的范围（用单元集表示），一个物理铺层对应一个 Ply 卡片，然后通过 Stack 卡片把各个 Ply 按次序层叠起来，形成完整的层合板。例如，复合材料 T 形长桁与蒙皮胶接结构可以通过如图 6-2 所示的方法来定义。

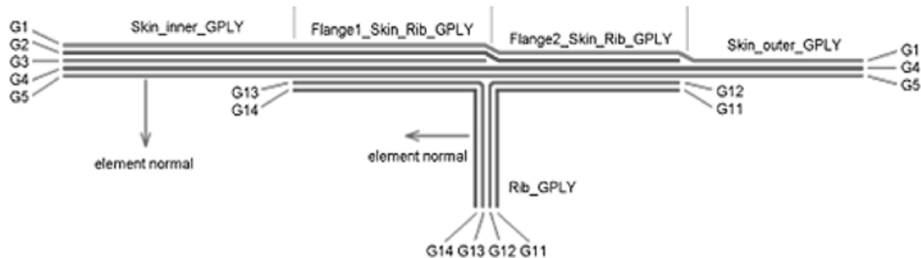


图 6-2　Ply+Stack 的建模方法

采用 Ply＋Stack 建模技术，可以方便地对复合材料层合板进行建模和编辑、三维显示和铺层方向显示等，如图 6-3 所示。



图 6-3 复合材料层合板的三维显示

6.1.2 复合材料分析求解技术

HyperLaminate 自带经典的层合板理论求解器，可以计算出层合板的[***A***][***B***][***D***]矩阵（如图 6-4 所示），以及等效的材料[***G***1], [***G***2], [***G***3], [***G***4]矩阵，可以将复杂的三维各项异性的复合材料层合板等效转换成简单的二维各向异性材料平板，实现模型信息保密，方便采用 PSHELL 单元建模。

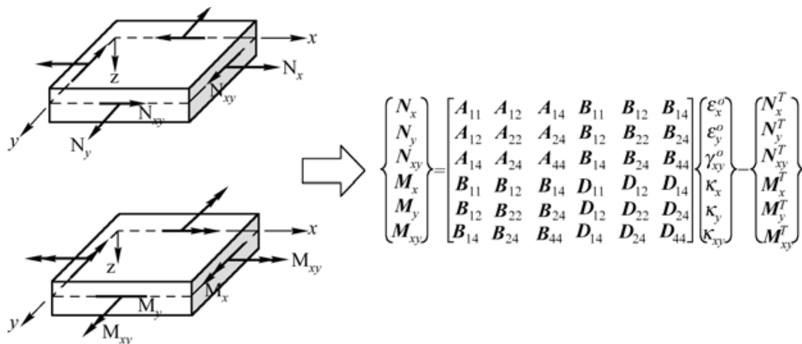


图 6-4 复合材料层合板转换成等效的各向异性平板

RADIOSS 是功能强大的有限元求解器，具有线性，显式、隐式非线性求解功能，拥有拉格朗日、欧拉、ALE、SPH 等算法，及有限元、有限体积等数值处理技术；可用于结构的线性、非线性和流固耦合等问题的求解。RADIOSS 支持复合材料的定义和求解，支持 PCOMP 定义铺层，PCOMPG 定义总体分层，PCOMPP 定义铺层形状及次序，可以方便地求解出各铺层的应力、应变和失效指数。此外，RADIOSS 提供多种单元和材料格式，可以精确地模拟各种非线性现象，如分层，失效、撞击破坏等（如图 6-5 所示）；提供全面的失效准则，如 Tsai-Wu、Chang-Chang、Hashin、Puck、Yamada Sun & Ladeveze-Allix 准则，并且可以在一种材料中应用多种失效准则。

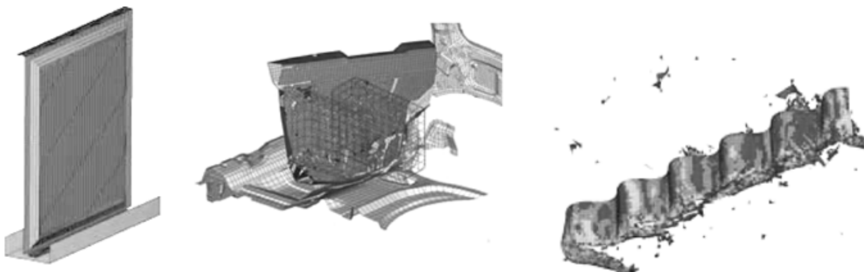


图 6-5 基于 RADIOSS 的航空复合材料结构冲击破坏分析

6.1.3 复合材料结构优化和减重技术

OptiStruct 具有强大而全面的复合材料优化能力，支持从最初的零件结构样式，到铺层裁剪形状和厚度分布，到铺层角度和层数（铺层比）的优化，到最终铺层层叠次序的各个阶段的优化设计方法，可以考虑各铺层的应力、应变、失效，屈曲等性能约束，以及各种工艺要求，提供了前所未有的复合材料优化设计能力，其设计流程如图 6-6 所示。

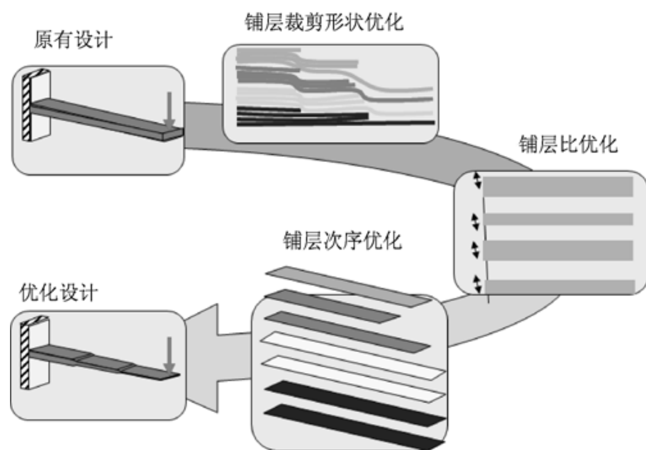


图 6-6　基于 OptiStruct 的复合材料优化设计流程

6.2　实例：复合材料自行车车架优化

本实例介绍对复合材料自行车架进行铺层厚度优化的方法。图 6-7 为本实例中将使用的模型。

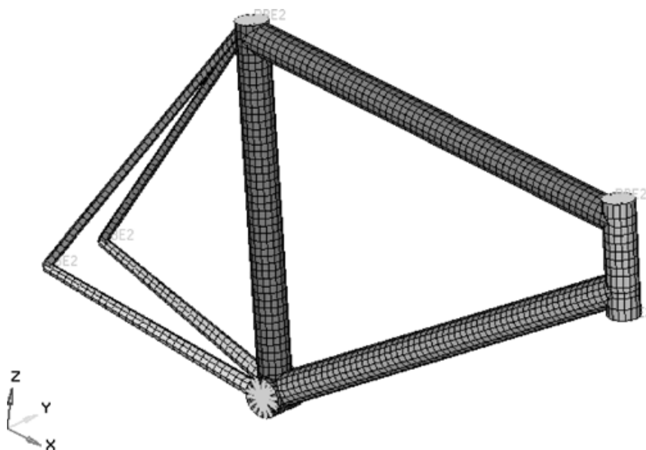


图 6-7　自行车车架模型

本实例中的优化问题描述如下。

√ 设计目标：体积最小。

√ 设计约束：给定的最大节点位移。
√ 设计变量：铺层厚度。

本实例包含以下内容：

√ 建立复合材料车架的尺寸优化问题并求解。
√ HyperView 中复合材料尺寸优化结果的后处理。

STEP 01 运行 HyperMesh 并设置 User Profile

（1）启动 HyperMesh。
（2）选择 OptiStruct 作为 User Profile。
（3）单击 OK 按钮。

此步骤载入 User Profile。它包括对应的模板，宏菜单和文件导入工具，并且为了生成 RADIOSS 和 OptiStruct 使用的批量数据格式模型，削减了 HyperMesh 的某些功能。

（4）选择工具栏中的 Open Model 按钮。

选择 bicycle_frame.hm 文件，该文件位于 HyperMesh 安装目录<install_directory>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下。

（5）单击 Open。

bicycle_frame.hm 数据文件被载入到当前 HyperMesh 中，并代替已存在的数据。此时将会发现，结构模型中单元属性和材料数据均已定义。以下将模拟自行车快跑工况。

STEP 02 为载荷和边界条件创建 Load Collectors

（1）选择 Load Collectors 按钮。
（2）在左边面板的单选框中选择 create 子面板。
（3）单击 loadcol name = 并输入 crank。
（4）单击 Color，并从调色板上选择一种颜色。
（5）单击创建方式按钮，并从弹出的菜单中选择 no card image。
（6）单击 create 按钮。

这一步创建了一个新的 load collector，名为 crank。

（7）单击 loadcol name = 并输入 spcs。
（8）单击 Color，并从调色板上选择另一种颜色。
（9）单击 create 按钮。

这一步创建了一个新的 load collector，名为 spcs。

（10）单击 return 按钮返回到主菜单。

STEP 03 创建载荷

（1）在 HyperMesh 窗口右下角单击 Set Current Load Collector，进入一个新的 load

collectors 面板。

（2）从 load collectors 的列表中选择 crank。

（3）从 Analysis 页面中选择 forces 面板。

（4）在左边面板的单选框中选择 create 子面板。

（5）操作对象选择 nodes。

（6）在图形区，选中图 6-8 中所示的刚性连接处的中心节点。

（7）设定坐标系为 global system。

（8）单击 magnitude =并输入-100。

（9）单击 magnitude =下方的按钮，从弹出的菜单中选择 z-axis。

（10）单击 Create 按钮。

这一步在踏板位置创建了一个力。

（11）单击 return 按钮返回到主菜单。

（12）从 Analysis 页面中选择 moments 面板。

（13）在左面板的单选框中选择 create 子面板。

（14）操作对象选择 nodes。

（15）在图形显示区，选中图所示的刚性连接处的中心节点。

（16）设定坐标系为 global system。

（17）单击 magnitude =并输入 100。

（18）单击 magnitude =下的方向定义开关，从弹出菜单中选择 x-axis。

（19）单击 Create。

这一步在踏板位置创建了一个扭矩，如图 6-8 所示。

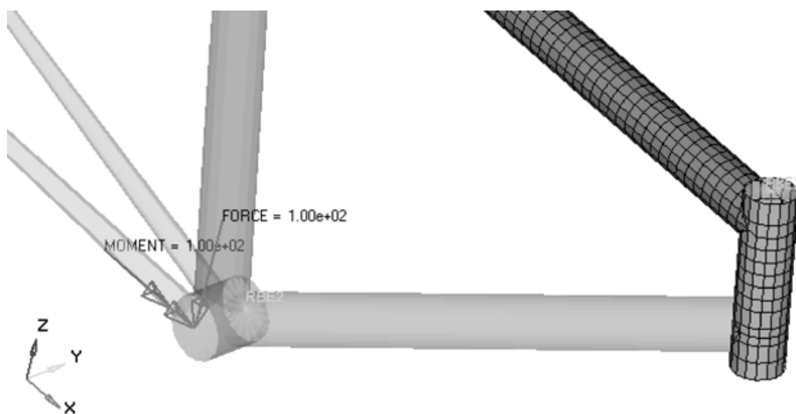


图 6-8　在自行车支架的底部加载

注意：这是一个简化加载模型，模拟脚踩在踏板上时的载荷工况。

（20）单击 return 按钮。

STEP 04 创建约束

（1）在 HyperMesh 窗口的右下角单击 Set Current Load Collector，像步骤 03 一样，进入

一个新的 load collectors 面板。

（2）从 load collectors 列表中选择 spcs。

注意此时 spcs 出现在页面的右下角，表明 spcs 为当前 load collector。

（3）从 Analysis 页面中选择 constraints 面板。

（4）在左边面板的单选框中选择 create 子面板。

（5）操作对象选择 nodes。

（6）选择图 6-9 和图 6-10 所示的节点，通过单击刚性连接处的中心点来约束结构。

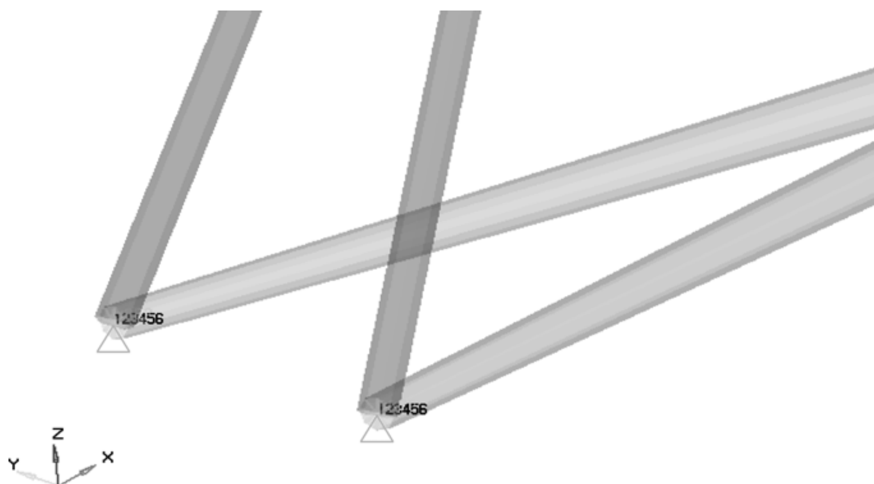


图 6-9 在车架后轮处施加 SPCs

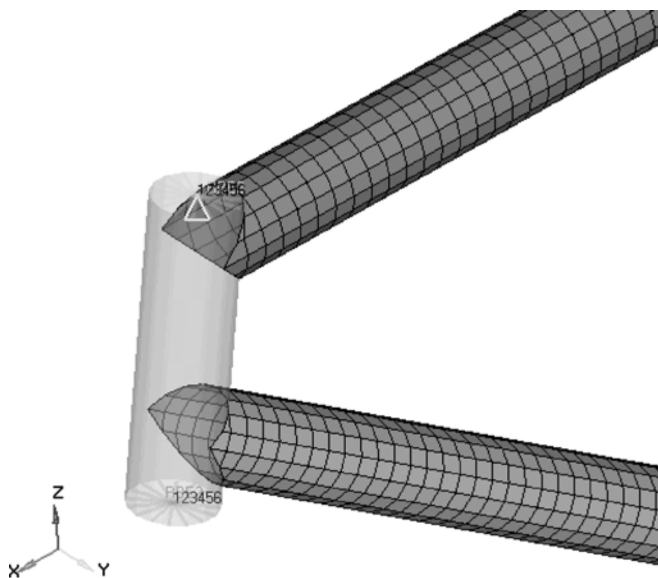


图 6-10 在前套管的上下部施加 SPCs

（7）约束 dof1，dof2，dof3，dof4，dof5 和 dof6。

选中的 dofs 将被约束，其余则是自由的。

dofs1，dofs2 和 dofs3 代表 *x*，*y* 和 *z* 方向上的平动自由度。

dofs4，dofs5 和 dofs6 代表 *x*，*y* 和 *z* 方向上的转动自由度。

（8）单击 Create 按钮。

这一步对选定的节点施加了这些约束。

（9）单击 return 按钮返回到主菜单。

STEP 05 创建 OptiStruct 子工况

（1）从 Analysis 页面中选择 loadsteps 面板。

（2）单击 name =并输入 crank。

（3）单击 type 开关，选择 linear static（如果它没有被默认选中的话）。

（4）选择 SPC 前的复选框。SPC 右边出现输入区。

（5）单击输入区，从 load collectors 的列表中选择 spcs。

（6）选中 LOAD。

（7）单击输入区，从 load collectors 的列表中选择 crank。

（8）单击 Create 按钮。

此时，定义在 spcs 中的边界条件以及定义在 crank 中的载荷同时作用的 OptiStruct 工况已经创建好。

（9）单击 return 按钮返回到主菜单。

STEP 06 定义设计变量

（1）从 2D 页面中选择 HyperLaminate 面板。

这一步启动了 HyperLaminate GUI。接下来的步骤在 HyperLaminate GUI 中进行。

（2）在屏幕的左侧扩展树形结构的 Design Variable 部分，将出现 DESVAR 分支。

（3）使用鼠标右键单击 DESVAR，出现一个含有 NEW 选项的浮动菜单。

（4）单击 New。

这一步创建了一个默认名为 NewDv1 的新的设计变量，且树形结构被展开。

（5）使用鼠标右键单击 NewDv1，选择 Rename 重命名设计变量为 thk1，覆盖默认设计变量名。

（6）在 Initial value 处输入 1.0。

（7）在 Lower bound 处输入 0.0。

（8）在 Upper bound 处输入 2.0。

（9）单击 Apply。

（10）重复步骤（4）～（9），用相同的方式及同样的数值，共创建 5 个设计变量，即 thk2、thk3、thk4 和 thk5。

此外，也可以通过鼠标右键单击 thk1，从浮动菜单中选择 Duplicate，创建一个同样的设计变量。重复这个过程 4 次，共创建 5 个设计变量，然后通过鼠标右键单击它们并选择 Rename，对它们重命名。

（11）通过检查 PCOMP 分支，以查看模型中所有的 PCOMPs。

（12）选择 seat_tube PCOMP。

界面中显示层压板的详细信息。

（13）使用鼠标右键单击靠近中间面板顶端的 Optimization 复选框。

在铺层次序表里出现了新的区域，它允许设计变量与铺层厚度和铺层方向相关联。

（14）在第一行的 Optimization 下，单击 Designvar 下的区域。

（15）从下拉菜单中选择 thk1。

（16）对于其他行重复步骤（14）和（15），如图 6-11 所示。

		T1	Designvar	(Degrees)	Designvar	
1	T300 5208 Carbon Epc	1.0	thk1	0.0		YES
2	T300 5208 Carbon Epc	1.0	thk2	45.0		YES
3	T300 5208 Carbon Epc	1.0	thk3	90.0		YES
4	T300 5208 Carbon Epc	1.0	thk4	-45.0		YES
5	T300 5208 Carbon Epc	1.0	thk5	0.0		YES

图 6-11　设置设计变量范围

（17）单击 Update Laminate。

此时，设计变量 thk(i)与 ply(i)的厚度关联，在本实例中，ply(11-i)也一样，因为这是一个对称的层压板。

（18）使用和 seat_tube 属性相同的 DVs，对 TOP_tube 和 down_tube 重复这些操作。

（19）从 File 下拉菜单中选择 Exit，退出 HyperLaminate GUI 返回到 Hypermesh。

STEP 07 创建位移和体积响应

创建一个在加载处节点总的位移响应，并将该响应的最小化设为优化目标。

（1）从 Analysis 页面中选择 optimization 面板。

（2）选择 responses 面板。

（3）单击 responses=并输入 disp。

（4）单击 response type 按钮，从弹出的菜单中选择 static displacement。

（5）单击 total disp 按钮。

（6）单击 nodes，在图形显示窗口中选中支架底部的加载处节点。

（7）单击 Create 按钮。

（8）单击 response=并输入 volume。

（9）单击 response type 按钮，从弹出的菜单中选择 volume。

（10）默认为 total。

（11）单击 Create 按钮。

（12）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 08 创建位移响应约束。

（1）进入 dconstraints 面板。
（2）单击 constraint=并输入 Disp。
（3）选中 upper bound =。
（4）单击 upper bound =并输入 1.8。
（5）单击 response =并从响应列表中选择 disp。
（6）面板中出现一个 loadsteps 按钮。
（7）单击 loadsteps。
（8）选中 crank 并单击 select。
（9）单击 Create 按钮。

一个约束已经定义在 disp 响应上。它表明任何求解（体积最小）所需要的位移小于 1.8mm 才是可行的。

STEP 09 定义目标

（1）单击 return 按钮返回 optimization 面板。
（2）选择 objective 面板。
（3）单击左侧按钮并选择 min。
（4）单击 response=并从弹出的菜单中选择 volume。
（5）单击 Create 按钮。
（6）单击 return 按钮两次，并返回主菜单。

STEP 10 优化计算

（1）从 Analysis 页面选择 OptiStruct 面板。
（2）在 input file 区域下单击 save as。
（3）选择 OptiStruct 模型文件的输出路径，并在 File name 中输入文件名 bicycle_frameOPT.fem。.fem 扩展名为 OptiStruct 所默认的输入格式。
（4）单击 Save 按钮。

注意 input file 中 bicycle_frameOPT.fem 文件的名称和保存位置。

（5）设置 export options 为 all。
（6）将 run options 设为 optimization。
（7）设置 memory options 为 memory default。
（8）单击 OptiStruct。

这一步启动 OptiStruct 优化计算。如果计算成功，可以在 OptiStruct 模型文件的调用目录下找到新的结果文件。bicycle_frameOPT.out 文件可以用于查找错误信息，如果出现任何错误，这些信息将有助于调试。

HyperView 中复合材料尺寸优化结果的后处理

STEP 11 在 HyperGraph 中查看结果

查看设计变量和优化目标历程：

（1）打开 HyperView 界面。

（2）从 File 下拉菜单中选择 Open 命令，出现一个 Open Session File 浏览窗口。

（3）选择由 OptiStruct 运行得到的 bicycle_frameOPT_hist.mvw 文件，单击 Open。该文件包含了整个迭代历程中，优化目标、约束以及设计变量的曲线图。第一页显示的是 Objective function，如图 6-12 所示。

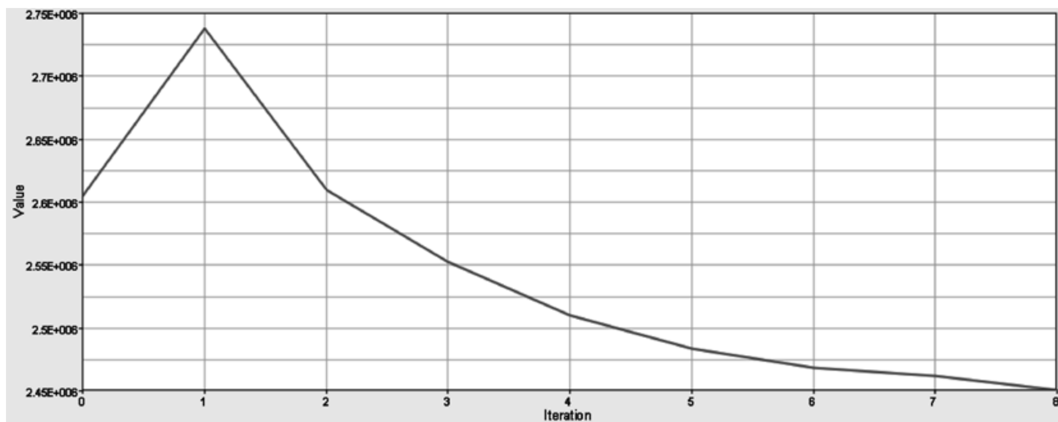


图 6-12　每一迭代步的目标值（体积）

第二页显示的是 Maximum Constraint Violation，如图 6-13 所示。

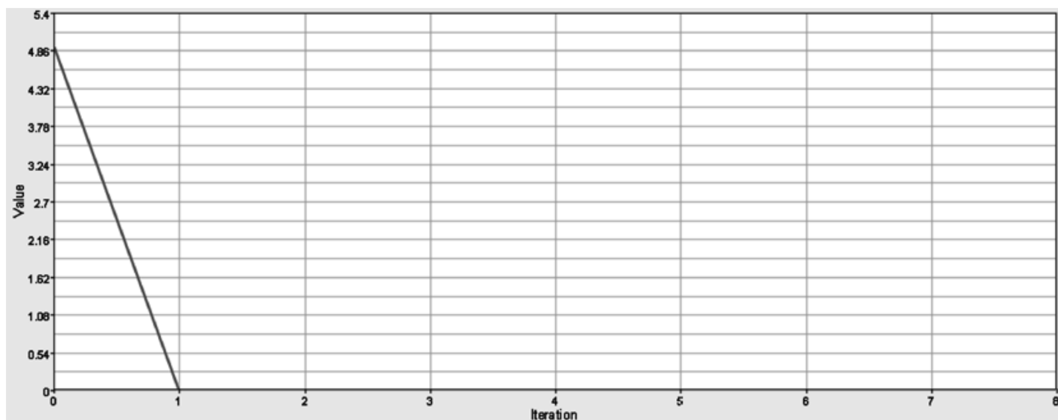


图 6-13　每一迭代步的最大约束违反值(%)

第三页显示的是 Design Variables (DVs)，对应 bicycle_frameOPT.hgdata 文件，变量迭代变化曲线如图 6-14 所示。

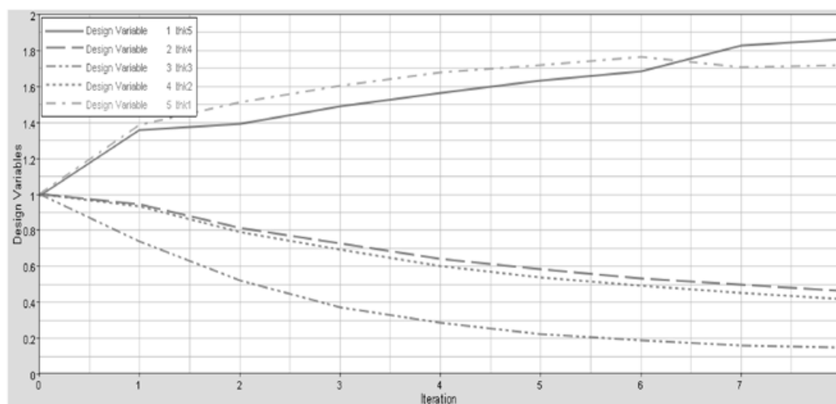


图 6-14　每一迭代步的设计变量值

6.3　实例：飞机水平尾翼优化

本实例演示对飞机水平尾翼（模型如图 6-15 所示）的复合材料蒙皮及铝合金肋板厚度进行优化设计。

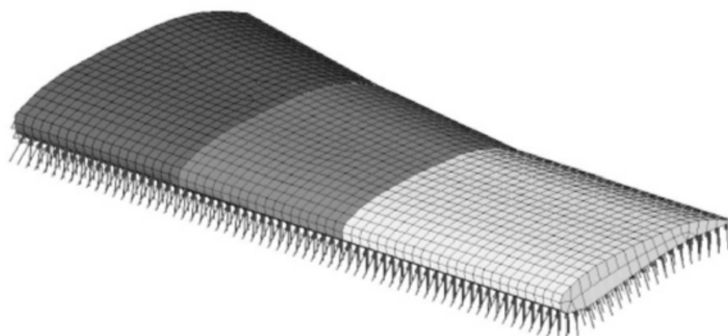


图 6-15　飞机水平尾翼模型

假设尾翼相对于内截面为悬臂梁。考虑 3 种加载方案：其一是在尾翼底面施加 0.25psi 的压力载荷；其二是施加 400lbs 的集中力；其三是同时施加压力载荷和集中力。图 6-16 所示为施加的载荷。

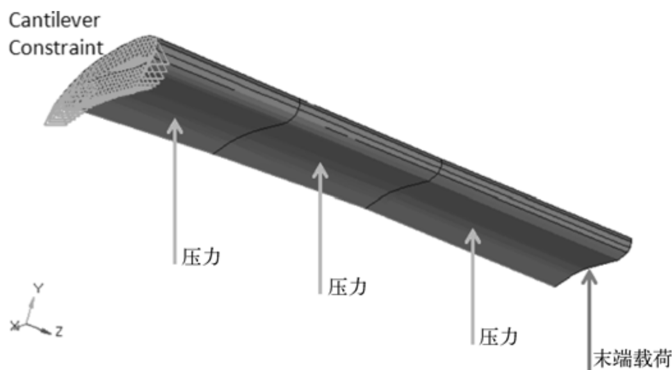


图 6-16　水平尾翼承受的载荷

表 6-1 列出了所用材料的相关参数。优化设计目的是对尾翼进行减重，并且在给定载荷条件下不失效和不屈曲。

表 6-1　本实例所用材料的参数

	Glass_fabric	Core		Aluminum 2024-T3
E1	4Msi (4.0e6 psi)	2ksi (2000 psi)	E	10.6Msi (10.6e6 psi)
E2	6Msi (6.0e6 psi)	4ksi (4000 psi)	Nu	0.33
NU12	0.1	0.3	G	4.06Msi (4.06e6 psi)
G12	800ksi(800000 psi)	3ksi (3000 psi)	Rho	0.1 lb/in3
G1Z	800ksi(800000 psi)	4ksi (4000 psi)	Yield	50ksi (50000 psi)
G2Z	800ksi(800000 psi)	4ksi (4000 psi)		
RHO	0.07 lb/in3	0.001074 lb/in3		
Xt	35ksi (35000 psi)	500 psi		
Xc	35ksi (35000 psi)	500 psi		
Yt	35ksi (35000 psi)	500 psi		
Yc	35ksi (35000 psi)	500 psi		
S	4ksi (4000 psi)	150 psi		

优化问题描述如下。

√ 设计目标：质量最小化。
√ 设计约束：复合材料蒙皮不能失效，铝肋板不能屈服，不能产生屈曲。
√ 设计变量：复合材料铺层厚度，肋板厚度。

本实例包括以下内容：

√ 用 HyperLaminate 面板定义材料及其几何属性。
√ 创建静态和弯曲变形的工况。
√ 完成基本的有限元分析。
√ 求解尺寸优化问题，并与初始设计的结果相比较。

STEP 01 启动 HyperMesh，设置 User Profile，并查看文件

（1）启动 HyperMesh。

（2）在 User Profile 对话框中选择 OptiStruct。

（3）单击 OK 按钮。

这一步载入 user profile，它包含了对应的模板、宏菜单和文件导入工具，并且为了生成 RADIOSS 和 OptiStruct 使用的批量数据格式模型，减少了 HyperMesh 的某些功能。User Profiles 也可在工具栏中的下拉菜单中获得。

（4）从 File 菜单中选择 Open。

（5）选择 tail_baseline.hm 文件，位于 HyperWorks 安装目录 <install_directory>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下。

（6）单击 Open。

（7）单击 Apply。

STEP 02 创建各向同性材料和属性并赋予金属肋板

（1）单击菜单栏上的 Model。

（2）使用鼠标右键单击里面的模型浏览器窗口，激活 Create 菜单并单击 Material。

（3）在 mat name=处输入 al2024-t3。

（4）选择 MAT1 作为 Card image。

（5）选择 type=为 ISOTROPIC。

（6）单击 create/edit，MAT1 卡片信息弹出。

（7）在 E、Nu 和 Rho 区域中分别输入 10.6e6、0.33 和 0.1。这些值能够从实例前面的 Aluminum 2024-T3 参数表格得到。

（8）单击 return 按钮。

（9）使用鼠标右键单击里面的模型浏览器窗口，激活 Create 菜单并单击 Property。

（10）在 prop name=处输入 Ribs。

（11）选择 type=为 2D。

（12）选择 PSHELL 作为 Card image。

（13）在第二行处，选择 al2024-t3 作为 Material。

（14）单击 Create/Edit，PSHELL 卡片信息弹出。

（15）单击 [T] 输入壳单元的厚度，单击切换开关输入数值 1.0。

（16）单击 return 按钮，返回主菜单。

（17）从 Collectors 菜单中选择 Create，并单击 Components。

（18）在 Create Component 对话框中，输入 Ribs 作为组件名。

（19）单击 colour 选择颜色。

（20）在属性处，激活 Assign property 旁的复选框，选择属性为 Ribs。

（21）确认所显示的 PSHELL 卡片信息和 al2024-t3 材料信息。

（22）单击 Create 按钮。

属性集 Ribs 已被创建。它被定义为厚度为 1.0 的 PSHELL。它与 Aluminum 2024-T3 材料定义和组件 Ribs 相关联。

（23）单击 return 按钮，返回主菜单。

用 HyperLaminate 创建材料和几何属性。

STEP 03 创建正交各向异性材料属性（用 HyperLaminate）

（1）从 2D 页面中选择 HyperLaminate 面板。

启动 HyperLaminate 图形用户界面。

（2）在左侧结构树上用鼠标左键单击 MAT8 使之高亮，再用鼠标右键单击高亮的 MAT8。

带有 New 的浮动菜单出现。

（3）单击 New。

一个新定义的材料产生并出现在左边的结构树的 MAT8 下的一个分支上。

（4）在 Define/Edit material 下单击 Material 的右边区域，显示默认名为 NewMaterial1。

（5）用 Glass_fabric 代替 NewMaterial1。

（6）根据前面表中提供的信息，填写 E1，E2，NU12，G12，G1Z，G2Z，RHO，Xt，Xc，Yt，Yc 和 S 等材料属性参数。如果需要可参考模型中的例子。

（7）单击 Apply。

一种各向异性材料 Glass_fabric 的定义已经完成了。

（8）重复步骤（4）～（7）步创建另一个叫 Core 的材料，材料的属性在表格中已给出。用户也可以另外选择一种不同的颜色。

现在在左边的结构树的 MAT8 分支上，有两个正交各向异性材料。

STEP 04 创建复合层压板（HyperLaminate）

（1）在左边的结构树上使用鼠标左键单击 PCOMP 使之高亮。

（2）使用鼠标右键单击高亮的 PCOMP。此时带有 New 的浮动菜单出现。

（3）单击 New。

一个新的层压板定义生成，并出现在左边的结构树的 PCOMP 下的分支上。

（4）定义层压板后，显示默认名 Name: NewLaminate1 。

（5）用 Inboard_section_top 代替 NewLaminate1。

（6）在右边区域单击 color 并为层压板选择一种颜色。

（7）对 Stacking sequence convention，切换开关 Convection 选择 Symmetric-Midlayer。

（8）在 Add/Update plies 下对铺层选项作如下选择设置。

√ 选择 Glass_fabric 作为 Material 。

√ 在 Thickness T1 处输入 0.25。

√ 在 Orientation (Degrees) 处输入 0。

√ 在 No. of Repetitions 处输入 1。

（9）单击 Add new ply 三次。

（10）在 Ply lay-up order 的第二行修改以下信息。

√ 选择 Core 作为 Material。

√ 在 Thickness T1 处输入 0.5。

√ 在 Orientation (Degrees) 处输入 45。

（11）在 Ply lay-up order 的第一行修改以下信息：

在 Orientation (Degrees) 处输入 90。

Ply lay-up order 应当如图 6-17 所示。

	Material	Thickness T1	Orientation°	SOUT	No. of Repetitions	Integration Points
1	Glass_fabric	0.25	90.0	YES	1	1
2	Core	0.5	45.0	YES	1	1
3	Glass_fabric	0.25	0.0	YES	1	1

图 6-17 inboard_section_top.铺层属性

（12）单击 Update Laminate。

Inboard_section_top 铺层定义完成，如图 6-18 所示。

Review

Ply lay-up: Inboard_section_top
Total number of plies: 5
Total thickness: 1.75

Ply	Material	Thickness T1	Orientation Degrees
1	Glass_fabric	0.25	90.0
2	core	0.5	45.0
3	Glass_fabric	0.25	0.0
4	core	0.5	45.0
5	Glass_fabric	0.25	90.0

图 6-18　Inboard_section 层压板

（13）使用鼠标右键单击 Inboard_section_top 并选择 Duplicate。

（14）重命名 PCOMP 为 Inboard_section_btm，通过鼠标右键单击 PCOMP 或在 Name 处编辑并改变颜色。

（15）如上所示，更新另外 4 个层压板的铺层角 (Outboard_section_btm，Outboard_section_top，Midspan_section_btm 和 Midspan_section_top) 。

（16）单击 Update Laminate。

在左边的结构树的 PCOMP 的分支上已有 6 个定义了的铺层，此时，结构树如图 6-19 所示的一样。

（17）从 File 菜单中选择 Exit。

这一步将退出 HyperLaminate GUI，并将信息导入 HyperMesh。

STEP 05 指定新创建的属性到相关联的组件中

至此已经划分了网格，定义了材料和几何属性。然而，这些单元没有对应正确的属性和材料信息。

（1）在 Model Browser 中展开 Component 列，并使用鼠标右键单击 Inboard_section_top ，然后单击 Edit。

（2）切换到 Property，并单击 Assign Property 旁的复选框。

（3）将 Type 设置为 all，从下拉菜单中选择 Inboard_section_top，在对话框的底部单击 Update ，将组件与属性正确对应。

（4）重复步骤（1）～（3）步确定所有的 Inboard，Midspan 和 Outboard 部分与属性正确对应。

STEP 06 将单元放进正确的 Component Collectors

（1）应用 model browser，使用鼠标右键单击 LoadCollector，并选择 Hide。

（2）在键盘上按〈O〉键 (使用 Options 面板)。

（3）在面板的左边选择 mesh 单选按钮。

（4）设置 feature angle= 为 37。

这里允许通过特征角来选择单元。

（5）单击 return 按钮。

（6）从 Tool 页面选择 organize 面板。

（7）选择顶部内侧部分的一个单元，如图 6-19 所示。

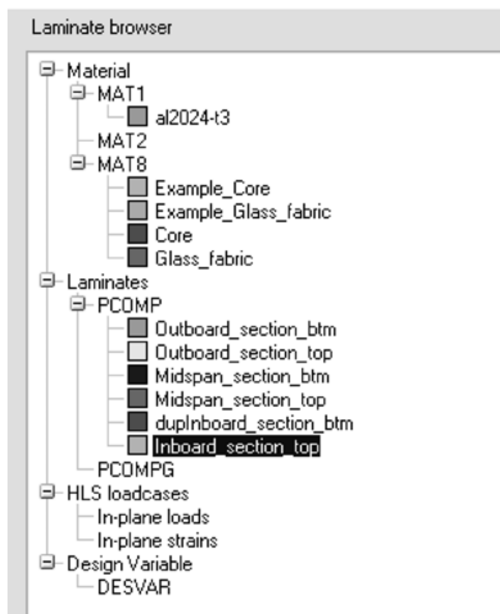


图 6-19　更新后的结构树

（8）单击 elems 并选择 by face。

注意顶面的许多单元被选中了，两个单元之间的角度超过 37° 将不会被选中。在顶面和底面之间的肋板单元间角度为 90°，因此也不会被选中。

（9）单击 dest =，并从 component collectors 中选择 Inboard_section_top。

（10）单击 Move。

（11）重复步骤（7）～（9），最终结果如图 6-20 所示。

（12）使用鼠标右键单击 Tail 并选择 Isolate Only。

现在只有在 tail collector 中形成肋板的单元显示。

（13）从 Tool 页面中选择 organize 面板。

（14）单击 elems 并选择 displayed。

（15）单击 Destination =，并从 component collectors 列表中选择 Ribs。

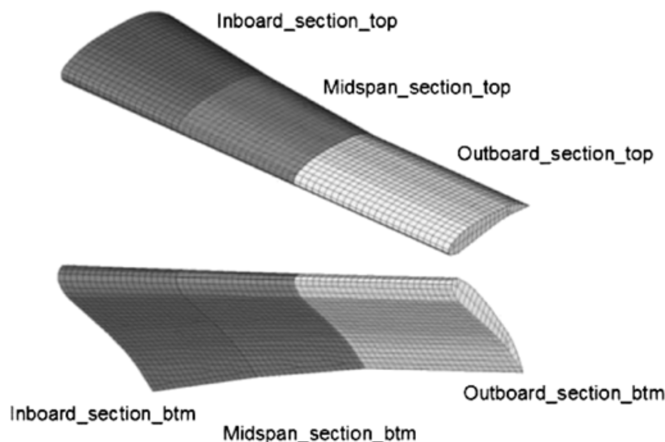


图 6-20　蒙皮单元放进正确的 component collectors

（16）单击 Move。
（17）应用 Model Browser，使用鼠标右键单击 Component，并选择 Show。
（18）单击 return 按钮，返回主菜单。
（19）在键盘上按〈F2〉键。
（20）选择 comps。
（21）单击 preview empty 和 delete entity 删除所有的空组件，组件 tail 被删除。
（22）单击 return 按钮。

STEP 07 确定采用复合材料性能的单元的方位

（1）从 Tool 页面中选择 normals 面板。
（2）用面板左边的复选框按钮选择 elements 子面板。
（3）选择 elems。
（4）单击 elems 并选择 by collector。
（5）选中 Ribs 旁的单选框。
（6）单击 comps 并从扩展列表中选择 reverse 。
（7）单击 select 。
（8）单击 display normals。
可以发现不是所有单元都在同一方向上。如果不是，参考步骤（9）和（10）。
（9）单击 orientation 下的 elem，并选择向内的一个单元。
（10）单击 adjust normals。
现在所有的“蒙皮”法线方向应该向内，所有单元的蒙皮法线方向沿着局部的 Z 轴方向。
（11）单击 return 按钮，返回主菜单。
（12）从 2D 页面中选择 composites 面板。
（13）确认选择了 material orientation 复选框。
（14）选择“蒙皮”Components（除了肋板外的所有 Component）的单元。

（15）单击 Material orientation method 下的切换开关，并从下拉菜单中选择 by vector。

（16）单击 by vector 下的转换开关，并从下拉菜单中选择 z-axis 。

（17）单击 project。

把每个选中单元的局部 *X* 轴定义为全局 *Z* 轴的投影，在图上以每个单元上的白色小箭头表示，现在已经为 Inboard_section_top、Inboard_section_btm、Midspan_section_top、Midspan_section_btm、Outboard_section_top 和 Outboard_section_btm 的所有单元，定义了局部的 *X* 和 *Z* 轴。这样就完全建立了所有复合层压板单元的局部方向。

（18）单击 return 按钮。

在这个练习中考虑了 3 个加载方案：一是在底部蒙皮翼板承受压力载荷；二是翼板承受端部载荷；三是翼板同时承受压力载荷和端部载荷。

当前有一个压力载荷集和一个集中载荷集，但是没有包含两个载荷的载荷集。因此必须创建一个将 pressure 和 tip_load 组合的载荷集。

STEP 08 创建一个组合载荷集

（1）使用鼠标右键单击 Model Browser 窗口，激活 Create 菜单并单击 LoadCollector。

（2）单击 Name 处输入 Combined。

（3）选择一种恰当的颜色。

（4）单击 Card image，选择 LOAD。

（5）单击 Create/Edit。

一个 OptiStruct LOAD 卡片生成，card image 出现在显示区域的下面。载荷卡片上的信息参阅 OptiStruct 在线帮助。

（6）单击 LOAD_Num_Set = 并输入 2。

这一步表示要组合的载荷集个数。

（7）如果它没有提前出现，在 S 下的区域中输入 1.0。

（8）在 S1(1)下的区域中输入 1.0。

（9）双击 L1(1)，并从载荷集列表中选择 pressure。

（10）在 S1(2)下的区域中输入 1.0。

（11）双击 L1(2)，并从载荷集列表中选择 tip_load。

（12）单击 return 按钮创建载荷集。

一个组合的载荷集生成，它组合了一倍 pressure 的载荷和一倍 tip_load 的载荷。

STEP 09 创建一个静态的和相关的屈曲工况

（1）在 View 下，确定 Utility Menu 面板被选中。

（2）单击 Utility 面板并选择 FEA。

（3）在 Loadsteps 下单击 Buckling。

出现 Create Buckling Subcases 窗口。在这个窗口中可以进一步创建静态的和屈曲工况。

（4）在 Name 区域中输入 pressure_only。

这是静态工况的用户自定义名，用 Name 作为静态工况名，则相关的屈曲工况命名为 buck_name。

（5）在 Name 下弹出的下拉菜单中选择 EIGRL 。

这表示特征值分析将用以计算屈曲模态。目前这是唯一的可用选项。

（6）在 V1 区域中输入 0.0。

这表示特征值的下限是 0.0，避免计算出负的屈曲模态（负的屈曲模态是指在载荷相反时发生的弯曲）。

（7）V2 区域可以是空白。

这是特征值的上限，本实例中将选择一定数量的模态来进行计算，而不是选择一定范围的特征值。

（8）在 ND 区域中输入 10。

这一步要求计算 10 个最低的屈曲模态。

（9）从 LOAD 右边的下拉列表中选择 pressure 。

（10）从 SPC 右边的下拉列表中选择 constraints。

（11）单击 Create 按钮。

现在已经创建了一个名为 pressure_only 的线性静态工况，这个工况组合了 pressure 载荷集中的压力载荷和在载荷集 constraints 中的单点约束。

这里生成了一个相关的名为 buck_pressure_only 屈曲特征值工况，这个工况将计算前 10 阶屈曲模态，远远大于 pressure_only 静态工况的 0 值。

（12）重复步骤（3）～（11）创建一个名为 tip_load_only 的静态工况，这个工况组合了载荷集 tip_load 中的压力载荷和在载荷集 constraints 中的单点约束。一个相关的屈曲特征值工况将计算大于 0 的前 10 阶屈曲模态。

（13）重复步骤（3）～（11）创建一个名为 combo 的静态工况，这个工况组合了载荷集 combined 中的载荷（包含载荷 pressure 和 tip_load）和载荷集 constraints 中的单点约束。一个相关的屈曲特征值工况将计算大于 0 的前 10 阶屈曲模态。

（14）关闭 Create Buckling Subcases 窗口。

STEP 10 对复合材料，要求输出应力、应变以及失效结果

对复合材料，应力、应变，以及失效结果不是默认输出项，需要设置输出项。

（1）单击 Card Editor 按钮 。

（2）单击面板左上角的转换开关，并从弹出的菜单中选择 props 。

（3）单击 props 并选择 Outboard_section_top。

（4）单击 edit。

Outboard_section_top 材料层的 PCOMP 卡显示在显示区域的较低部分，对于 PCOMP 属性信息可以索引在线帮助文档。

（5）如果在[FT] 下没有出现 HILL，单击[FT]，注意 HILL 出现在下方。

失效的理论分析已经激活。如果单击 HILL，弹出其他的失效理论列表，在本实例将用 Hill 失效准则。

（6）在 card image 窗口中单击[SB]，并在其下的区域中输入 3 500。

这是层间剪切强度，即焊接材料的剪切强度。3.5ksi 是一个假设的数值，因为没有给出材料的数据。

（7）单击 SOUT(1) 下的按钮，并从弹出的菜单中选择 YES 。

这要求 Ply1 的应力和应变结果都被输出。

（8）设置所有的其他层，SOUT(2)、SOUT(3)、SOUT(4) 和 SOUT(5) 也都为 YES 。

（9）单击 return 按钮，以保留 card image 的变化。

（10）对其他的层压板重复步骤（3）～（9）。

（注意: 选择所有的 PCOMP props，确认单击 HILL）。

（11）单击 return 按钮，返回主菜单。

（12）从 Analysis 页面中选择 control cards 面板，然后选择 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST。

（13）确定从 control cards 列表下选中 CSTRAIN 。

CSTRAIN card image 显示在显示区域的较低部分。

（14）确定从 control cards 列表下选中 CSTRESS 。

CSTRESS card image 显示在显示区域的较低部分。

复合层压板的应力应变以及失效结果将输出。

（15）单击 return 按钮，返回主菜单。

STEP 11 进行基准有限元分析

（1）从 Analysis 页面中进入 Radioss 面板。

（2）单击 save as，输入 tail_baseline_complete.fem 作为文件名，并单击 Save 按钮。

（3）将 export options 设置成 all。

（4）将 run options 设置成 analysis。

（5）把 memory options 设置成 memory default。

（6）将 options 区域设为空白。

（7）单击 Radioss 运行分析。

如果 Processing complete 信息出现在窗口中表明分析完成。如果有错误，RADIOSS 也会报告出来。tail_baseline_complete.out 文件能够用一个文本编辑器打开，以查找错误的详细信息。这个文件被写入到和.fem 文件同一个目录下。

（8）关闭 DOS 窗口并单击 return 按钮。

STEP 12 查看.out 结果分析文件

在进行 RADIOSS 分析的位置，可找到一个 tail_baseline_complete.out 文件。这个文件包含运行分析的摘要信息。用户可以使用文本编辑器打开 tail_baseline_complete.out 文件。

这个文件包括以下内容：

- 有限元模型摘要。
- 优化参数的摘要。

- 内存和磁盘空间的估算。
- 分析结果。

基准模型的体积、质量以及弯曲模态在分析结果部分中已经给出，如下列的 tail_baseline_complete.out 分析结果部分所示。

```
ANALYSIS RESULTS :
------------------
ITERATION      0

 (Scratch disk space usage for starting iteration = 45 MB)
(Running in-core solution)

Volume =    7.71079E+04     Mass        =    2.49519E+03

 Subcase     Compliance
          1   5.455523E+02
          3   2.486302E+01
          5   7.735483E+02

 Subcase    Mode    Buckling Eigenvalue
          2        1        2.044957E+01
          2        2        2.549003E+01
          2        3        2.890934E+01
          2        4        3.085576E+01
          2        5        3.391788E+01
          2        6        3.650698E+01
          2        7        3.804621E+01
          2        8        4.303335E+01
          2        9        4.397765E+01
          2       10        4.576890E+01
          4        1        9.616548E+01
          4        2        1.085994E+02
          4        3        1.296144E+02
          4        4        1.515954E+02
          4        5        1.530670E+02
          4        6        1.577144E+02
          4        7        1.666631E+02
          4        8        1.893939E+02
          4        9        1.911800E+02
          4       10        1.946568E+02
          6        1        1.699245E+01
          6        2        2.137808E+01
          6        3        2.321089E+01
          6        4        2.572370E+01
          6        5        2.758121E+01
          6        6        3.074618E+01
```

6	7	3.138572E+01
6	8	3.449761E+01
6	9	3.724739E+01
6	10	3.782562E+01

STEP 13 查看位移结果

（1）一旦命令窗口中出现 Process completed successfully 信息，单击 HyperView 按钮。

启动 HyperView 载入结果，出现一个消息窗口报告成功载入模型和结果文件到 HyperView 客户端的一个新的页面。

（2）单击 Close 按钮关闭消息窗口。

（3）设置 animation 为 Linear Static。

（4）单击 Contour 按钮。

（5）确定 Result type 为 Displacement [v]。

选择下拉菜单中的 Mag。

（6）单击 Apply 显示位移云图如图 6-21 所示。

注意：这个云图显示的是在第一个工况 [pressure only]下的。用户同样也可以查看其他工况下的云图。

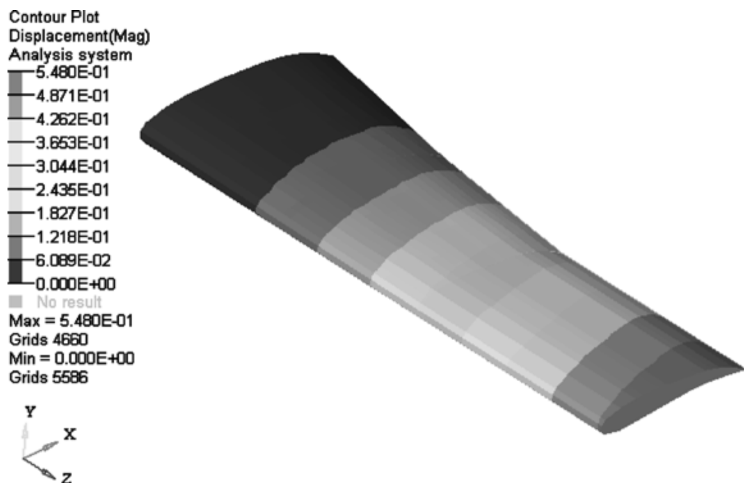


图 6-21 pressure_only 工况下的位移云图

STEP 14 在 HyperView 中查看应力结果

（1）单击 Entity Attributes 按钮。

（2）确认 Auto apply mode 框被选中。

（3）单击 Display 右边的 Off 按钮。

这将导致所有的被选择的部件，无论是在显示区的还是部件列表中的都被隐藏。

（4）在 GUI 中单击部件，隐藏除了 ribs 外的所有部件。
（5）单击 Contour 按钮或者从 Graphics 下拉菜单中选择 Contour。
（6）从 Result type 菜单中选择 Element Stresses (2d & 3d) [t]。
（7）选择下拉菜单中的 von Mises。
（8）单击 Apply。
金属肋板的 von Mises 应力云图如图 6-22 所示。

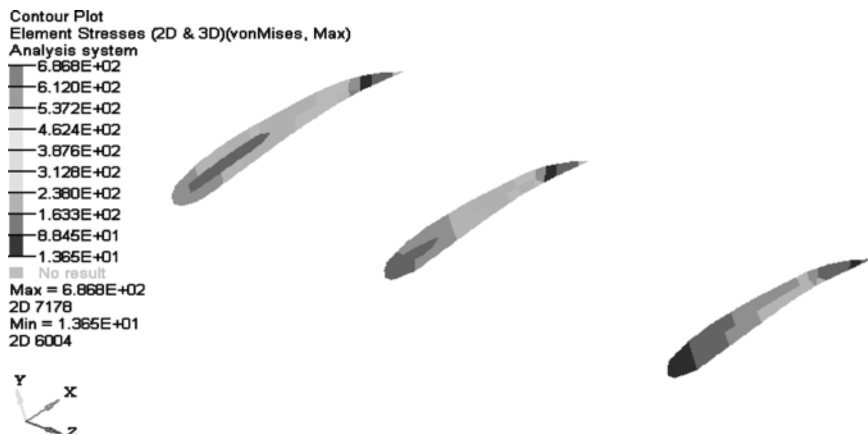


图 6-22　肋板单元应力云图

（9）单击 Entity Attributes 按钮。
（10）单击 Flip。
现在 Ribs 组件被隐藏，而复合层压板组件显示出来了。
（11）单击 Contour 按钮或者从 Graphics 下拉菜单中选择 Contour。
（12）把 Result type 设置成 Composite Failure(s)（第一行）和 Ply Failure（第二行）。
（13）在第三个列表中设置 Entity with Layers 为 1。
（14）单击 Apply。
第一层复合材料蒙皮的失效指数云图如图 6-23 所示。

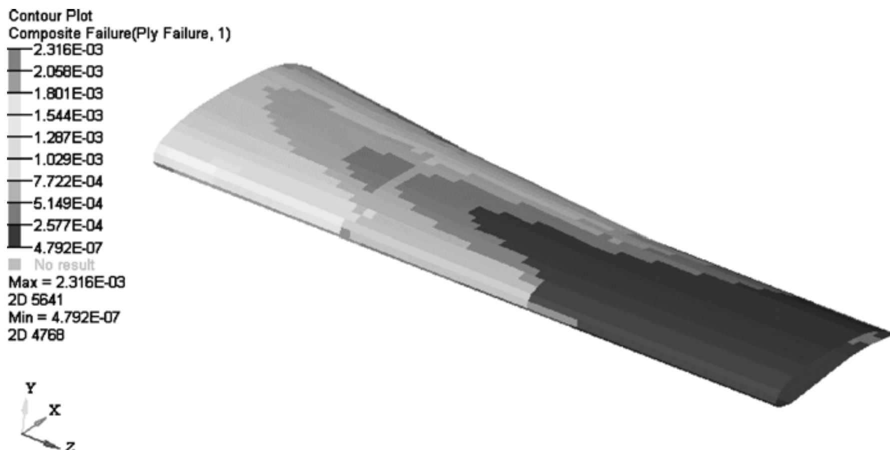


图 6-23　pressure only 工况下的第一层失效指数云图

通过估算单个铺层的失效指数之后，OptiStruct 可以对整体失效指数进行估算，前提是单个铺层失效视为综合失效。因此，整体失效指数估算为所有经计算的铺层和连接材料的失效指数的最大值（注意：此处只考虑有应力输出的铺层）。

（15）将 Entity with Layers 设置为 Max，以获得层压板的最大失效指数云图如图 6-24 所示。

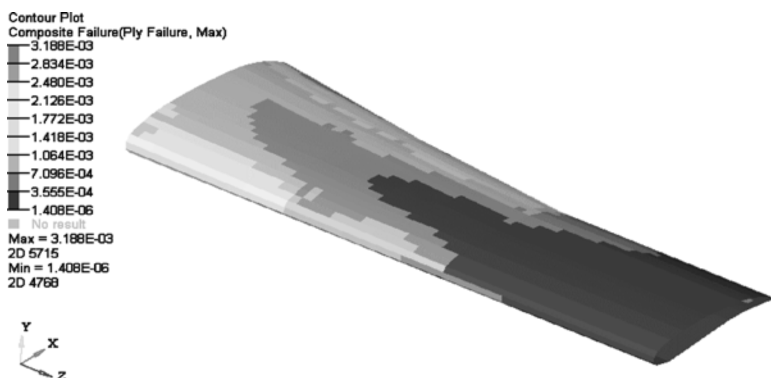


图 6-24　pressure only 工况下的整体失效指数云图

重复这一过程以查看所有工况下的整体失效指数。

接下来返回到 HyperMesh 设置优化问题。第一步是定义设计变量。本实例中的设计变量是肋板厚度和用在蒙皮上的复合材料参数。

STEP 15 为金属肋板定义和指定一个厚度设计变量

（1）从 Analysis 页面中选择 optimization 面板。

（2）从 optimization 面板中选择 gauge 面板。

（3）选择 create。

（4）单击 props 并选择 Ribs collector。

（5）选择 value from property。

这一步将设计变量初始值设置为属性卡片上定义的厚度值。

（6）切换 lower bound %按钮转换成 lower bound =，并输入 0.01。

这为设计变量设置了下限。

（7）切换 upper bound % 按钮转换成 upper bound =，并输入 2.0。

这为设计变量设置了上限。

（8）选择如 PSHELL - T 的 type，相应设置如图 6-25 所示。

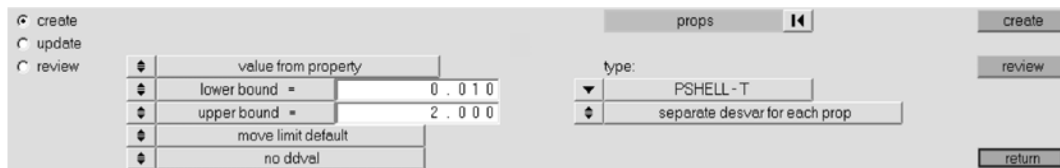


图 6-25　设置肋板厚度设计变量的 Gauge 面板

（9）单击 create 按钮。

（10）单击 return 按钮两次，返回主面板。

STEP 16 用面板定义复合材料的设计变量

（1）从 2D 页面中选择 HyperLaminate 面板。

启动 HyperLaminate 图形用户界面。

（2）在左边的结构树上单击 DESVAR 使之高亮。

（3）使用鼠标右键单击高亮的 DESVAR，出现一个带有 New 选项的菜单。

（4）选择 New，生成一个新的设计变量，这个设计变量的默认名为 NewDv1。

（5）通过双击 Desvar 右边的文本区域将设计变量重命名为 istgf_th (inboard_section_top，glass_fabric，thickness)，并且覆盖默认的设计变量名。

（6）在 Initial Value 区域中输入 0.25。

（7）在 Lower Bound 区域中输入 0.01。

（8）在 Upper Bound 区域中输入 1.0。

（9）单击 Apply。

（10）按照步骤（4）～（9）操作以及同样的数值再创建几个设计变量包含 isbgf_th。

（11）也可以使用鼠标右键单击 istgf_th，从弹出的菜单中选择 Duplicate 创建同样的设计变量，重复同样的过程创建其他的设计变量，然后使用鼠标右键单击这些变量并对其重命名。

（12）根据表 6-2 中的信息查看 HyperLaminate 里创建好的其他 10 个设计变量。

表 6-2　设计变量

设计变量	初始数值	下　限	上　限
mstgf_th	0.25	0.01	1.0
msbgf_th	0.25	0.01	1.0
ostgf_th	0.25	0.01	1.0
osbgf_th	0.25	0.01	1.0
istc_th	0.5	0.01	2.0
isbc_th	0.5	0.01	2.0
mstc_th	0.5	0.01	2.0
msbc_th	0.5	0.01	2.0
ostc_th	0.5	0.01	2.0
osbc_th	0.5	0.01	2.0

12 个设计变量已经生成，包括所有的复合材料层压板的玻璃纤维的厚度，另一个是所有的复合材料层压板的芯板厚度。因为复合层压板是对称的，所以玻璃纤维将参考芯板对称侧相同的设计变量。

STEP 17 用 HyperLaminate 将复合层压板属性与设计变量关联

（1）在结构树 PCOMP 的分支下单击 Inboard_section_top，层压板的信息在 GUI 里显示。

（2）单击 Optimization 旁边的单选框。Entry Rows 表出现新的区域，允许设计变量联系到铺层 Ply 的厚度和方向上。

（3）在 Ply lay-up order 下单击 Designvar，第一行 Thickness 下的区域。

（4）从下拉菜单中选择 istgf_th。

现在设计变量 istgf_th 联系到 Inboard_section_top 中 Ply1 和 Ply5（对称中性层的层压板）的 Glass_fabric 材料厚度上。

（5）单击 Designvar，第二行 Thickness 下的区域。

（6）从下拉菜单中选择 istc_th。

现在设计变量 istc_th 联系到 Inboard_section_top 中 Ply2 和 Ply4 的芯板材料的厚度上。

（7）单击 Designvar 下，第三行 Thickness 下的区域。

（8）从下拉菜单中选择 istgf_th。

（9）单击 Update Laminate 保存设计变量。

（10）重复步骤（1）～（9），为 Inboard_section_btm 的复合层压板，联系适当的设计变量。

（11）从 File 下拉菜单中选择 Exit。这将关闭 HyperLaminate GUI，输出设计变量和更新的层压板信息。

STEP 18 创建复合材料的质量、静态应力和失效响应

（1）从 Analysis 页面中选择 optimization 面板。

（2）选择 responses。

（3）单击 response= 并输入 mass。

（4）单击 response type 转换开关，并从弹出的菜单中选择 mass。

（5）单击 create 按钮。

优化响应 mass 生成，mass 是结构的总质量。

（6）单击 response= 并输入 vm_strs。

（7）单击 response type 转换开关，并从弹出的菜单中选择 static stress。

（8）单击 props 并选择 Ribs collector。

（9）单击 Select。一个新的选择开关出现在 comps 旁边。

（10）单击转换开关，并选择 von Mises。

（11）单击 von Mises 下的转换开关，并选择 both surfaces。

（12）单击 create 按钮。

优化响应 vm_strs 生成，vm_strs 是金属肋板的 von Mises 应力。

（13）单击 response= 并输入 hl_ist。

（14）单击 response type 转换开关，并从弹出的菜单中选择 composite failure。

（15）单击 props 并选择 Inboard_section_top collector。

（16）单击 props 旁边的转换开关并选择 hill。

（17）单击 hill 下的转换开关并选择 all plies。

（18）单击 create 按钮。

优化响应 hl_ist 生成。这是 Inboard_section_top 中复合蒙皮所有铺层的失效标准。

（19）重复步骤（12）～（18），创建其他复合层压板铺层的 Hill 失效准则的优化响应。类似的命名响应为 hl_osb、hl_ost、hl_msb、hl_mst 和 hl_isb。

（20）单击 response= 并输入 buckle。

（21）单击 response type 转换开关，并从下拉菜单中选择 buckling。

（22）单击 Mode Number 并输入 1。

（23）单击 create 按钮。

优化响应 buckle 生成，它是结构屈曲模态的最低模态计算值。

（24）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 19 创建约束和目标

最后必须定义约束和目标。在保证金属肋板的 von Mises 应力在屈服极限之下，复合蒙皮的综合失效指标小于 1.0，并且结构的最低阶屈曲模态因子大于 1 的情况下，要求结构的总质量最小化。

（1）选择 dconstraints 面板。

（2）单击 constraints = 并输入 cnst1。

（3）单击 response = 并输入 vm_strs。

（4）选中 upper bound = 前的单选框。

（5）单击 upper bound = 并输入 50 000。

（6）单击 loadsteps 并选择 pressure_only、tip_load_only 和 combo 三个工步。

（7）单击 select。

（8）单击 create 按钮。

对于所有的静态工况，定义了一个金属肋板的 von Mises 应力小于 50ksi 的约束。

（9）单击 constraints = 并输入 cnst2。

（10）单击 response = 并选择 hl_ist。

（11）选中 upper bound =前的单选框。

（12）单击 upper bound = 并输入 1.0。

（13）单击 loadsteps 并选择 pressure_only、tip_load_only 和 combo。

（14）单击 select。

（15）单击 create 按钮。

对于所有的静态工况，这一步定义了约束，使得 Inboard_section_top 中的复合蒙皮的 Hill 失效指标小于 1.0。

（16）重复步骤（9）～（15），创建其他的失效指标约束，即 cnst3～cnst7。

（17）单击 constraints = 并输入 cnst8。

（18）单击 response = 并选择 buckle。
（19）不选 upper bound = 前的单选框。
（20）选中 lower bound = 前的单选框。
（21）单击 lower bound = 并输入 1.0。
（22）单击 loadsteps 并选择 buck_pressure_only、buck_tip_load_only 和 buck_combo。
（23）单击 select。
（24）单击 create 按钮。
对于所有的线性屈曲工况，这一步定义了结构的最低屈曲模态因子大于 1.0 的约束。
（25）单击 return 按钮返回 optimization 面板。
（26）选择 objective 面板。
（27）单击左边的转换开关并选择 min。
（28）单击 response =，并从弹出的菜单中选择 mass。
（29）单击 create 按钮。
这一步定义了结构质量最小化的优化目标。
（30）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 20 定义附加的运行参数来辅助屈曲约束

为了使屈曲约束有效，必须定义附加的参数。
（1）选择 opti control 面板。
（2）选中 MAXBUCK= 前的单选框。
GBUCK= 前的单选框被自动选择。
这两个选项保证最多 10 个模态被考虑进屈曲约束中。详细的描述可参考 OptiStruct 的在线帮助。
（3）单击 return 按钮。

STEP 21 求解优化问题

（1）从 Analysis 页面中选择 OptiStruct 面板。
（2）单击 save as，输入 tail_opt.fem 作为文件名并单击 Save 按钮。
（3）把 export options 设置成 all。
（4）单击 run options 转换开关并选择 optimization。
（5）把 memory options 设置成 memory default。
（6）单击 OptiStruct。
Processing complete 信息出现在窗口中表明分析完成。如果有错误，OptiStruct 也会报告出来。tail_opt.fem.out 文件能够用一个文本编辑器打开，以查找错误的详细信息。这个文件被写入到和.fem 文件同一个目录下。
（7）关闭 DOS 窗口并单击 return 按钮。

STEP 22 浏览.out 优化摘要文件

运行 OptiStruct 优化的路径下，可以找到 tail_opt.out 文件。这个文件包含了执行优化的摘要。

用文本选择编辑器打开 tail_opt.out 文件。

文件包括以下内容：

- 有限元模型摘要。
- 优化参数摘要。
- 内存及磁盘空间的估计。
- 优化的迭代史。

优化迭代史部分提供了每一步迭代的目标函数值，保留的约束以及设计变量的值。样例的最终迭代步输出通过反复的迭代之后，其内容显示在目标函数中。

最后一步迭代提供了优化结构的质量、设计变量的值、目标的值以及保留的约束等这些信息。

STEP 23 用 HyperView 浏览迭代史

除浏览 tail_opt.out 文件的信息之外，用户可以用 HyperView 浏览优化的迭代史。

（1）从 File 下拉菜单中选择 Open 中的 Session，出现 Open Session File 窗口。

（2）从 OptiStruct optimization 运行的目录中选择 tail_opt_hist.mvw 文件。

（3）如果有其他的结果仍然在 HyperView 中，单击 Yes。

这是一个新的 HyperView 任务，该任务使用 tail_opt.hist 文件中的信息创建每次迭代的目标函数、约束以及设计变量。

图 6-26 所示的是任务的第一页，这一页生成了目标函数—迭代次数图。它表示优化过程中质量的迭代收敛过程。用户也可以查看设计变量和约束违反值得迭代收敛过程。

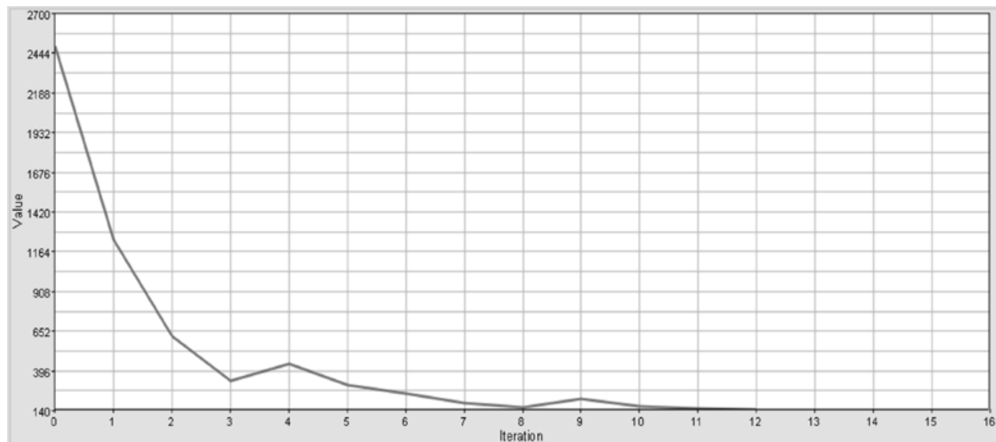


图 6-26　目标函数迭代收敛曲线

STEP 24 在 HyperView 中比较优化前后的结果

（1）启动一个新的 HyperView 任务。

（2）单击 Select application 工具栏按钮右边的向下键，并选择 HyperView 。

（3）单击 Yes。

（4）通过单击 Page Window Layout 图标，并从弹出的选项中选择视图，创建两个平面视图。

（5）通过单击左侧图形区激活左边的窗口，激活的窗格为蓝色边框。

（6）在 Load model 处单击，从运行 RADIOSS 基准分析的路径中选择 Tail_baseline_complete.h3d 文件。

（7）单击 Open。

注意：在 Load model 和 Load results 的区域中显示的 Tail_baseline_complete.h3d 文件名和路径。Hyper3D 格式包含模型和结果数据。

（8）单击 Apply。

模型和结果载入当前的 HyperView 窗口。

（9）通过单击右侧图形区激活右边的窗口。

（10）重复步骤（4）～（6）运行 OptiStruct 优化的路径载入 tail_opt_s1.h3d 文件。

对优化而言，密度、厚度以及形状结果写入文件*_des.h3d，分析的结果写入文件*_s#.h3d（静态分析结果，其中#是工况标示符）和*_m#.h3d（特征值分析结果，其中的#是工况数）。

（11）激活左边的窗口。

（12）在 Results Browser 中的 Load Case 和 Simulation 区域选择 Subcase 1 – Pressure_only 和 Static analysis。

（13）单击 OK 按钮。

（14）单击 Contour 按钮。

（15）从 Result type 下拉菜单中选择 Displacement (v)。

（16）单击 Apply。

（17）激活右边的窗口。

（18）在 Results Browser 中的 Load Case 和 Simulation 区域中选择 Static analysis 和最后一个 ITER #。

（19）单击 OK 按钮。

（20）单击 Contour 按钮。

（21）从 Result type 下拉菜单中选择 Displacement (v)。

（22）单击 Apply。

现在可以看到并排的优化前后的位移结果的比较，如图 6-27 所示，注意总位移值的巨大变化。如果动画，变形效果会更显著。优化的位移结果会比基准的更大，因为优化时没有位移约束。

（23）单击 Play 图标动画变形，再次单击动画停止。

用户可以用同样的步骤比较优化前后应力和整体失效图。

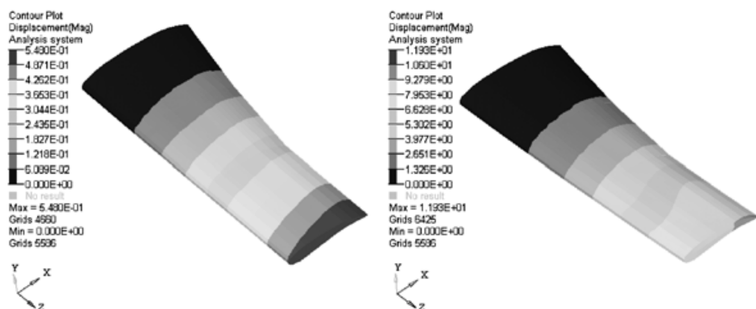


图 6-27　优化前后位移比较

STEP 25 把优化属性信息导入 HyperMesh

（1）从 File 菜单中选择 New 中的 Session。
（2）把 Client Selector 下拉到 HyperMesh 界面 。
这一步清除了界面之外的所有结果信息，包含了所有的页面。这将不会影响磁盘里的文件。
（3）从 File 下拉菜单中单击 Import 中的 Solver Deck。
（4）在 File 处的最后单击文件夹图标，并从运行优化的路径下选择 tail_opt.fem 文件。
（5）单击 Import。
这一步导入了*.fem 文件，优化在 HyperMesh 中运行。
（6）在 File 处的最后单击文件夹图标，并从运行优化的路径下选择 tail_opt.prop 文件。
OptiStruct 在优化运行的最后生成 tail_opt.prop 文件，这个文件包含了模型优化属性数据。
（7）在 Import 工具条下单击 import options。
（8）选中 FE overwrite 旁边的单选框。
（9）单击 Import。
（10）从 2D 页面中选择 HyperLaminate 面板。
（11）通过 PCOMP 属性单击并查看新的厚度。

6.4　小结

复合材料零件的设计自由度很多，如材料的各向异性、铺层的角度、形状、层数、次序等都是设计中需要考虑的，相比金属零部件的设计要困难。因此，先进的仿真技术是必不可少的。

HyperWorks 提供了目前业界最全面的优化设计方法，以及便捷的前后处理环境，本章的 2 个实例演示了基本的设计过程和技术。在实际工程项目中，需要考虑更多约束以提高优化的复合材料零部件的可行性，具体如下：

√ 对优化出来的铺层裁剪形状进行手工调整，以更好满足工艺要求，如丢层和粘接等。
√ 铺层层数优化阶段可考虑更多的复合材料失效准则。
√ 铺层次序优化也可设定更多约束，如表面铺层为±45°，设定某种形式的核心层并保持不变等。
√ 对于典型的复合材料蒙皮+长桁结构，需考虑与长桁的粘接等细节。

第 7 章

等效静态载荷法



对于运动机构的零件结构优化，常用的方法是提取出待优化零件的几组（几个关键时刻）边界载荷，然后施加在该零件上，进行静力多工况的优化。但是，运动机构的零件实际受到的是时间历程中的动态载荷，人为提取几个时刻的载荷往往不能反映该零件的真实受载过程，并且过程繁琐，需要分别进行运动机构仿真、载荷提取、优化分析 3 个方面的工作，并且容易出错。

OptiStruct 在业界首次把等效静态载荷法集成到优化算法中，比较完美地解决了上述运动机构零件的结构优化设计问题。该技术需要利用 HyperMesh 的多体动力学的前处理功能，在本章两个实例中有相关介绍，更多细节请参考在线帮助。

本章重点知识

7.1　等效静态载荷法简介
7.2　利用等效静态载荷进行结构动态优化
7.3　实例：四连杆机构的形状优化
7.4　实例：挖掘机工作臂的拓扑优化
7.5　小结

7.1 等效静态载荷法简介

等效静态载荷（Equivalent Static Load Method，ESLM）主要是用来代替动态载荷产生的效果，并且等效静态载荷对动态载荷效果的替代不仅仅局限于单一工况。在动态载荷下，物体表现最明显的一个特征就是动态载荷所造成的位移。因此，引入一个静态载荷，使物体在该静态载荷下变形形成的位移场同物体在承受某一动态载荷时的位移场相同，即通过位移场等效原理引入等效静态载荷，如图 7–1 所示。

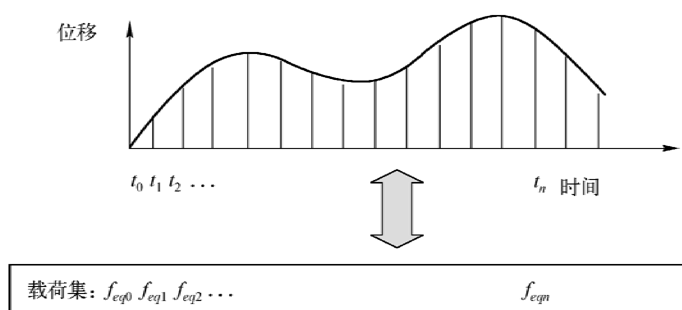


图 7–1　等效静态载荷集在选定时刻可以产生相同的位移场

事实上，等效静态载荷已经被广泛应用于工程领域，一般通过实验数据、动载系数及其他经验方法来获取等效静态载荷。在大多数工程实践中，等效静态载荷主要用来预测某些关键部位的变形或位移情况，如桥梁中点的位移情况。在这些应用中，等效静态载荷的时间信息已不是考虑对象，所考虑的仅仅是其数值的大小。

等效静态载荷的定义：当结构承受动态载荷时，在某一时刻结构都发生变形从而形成一个位移场。如果一个静态载荷能够产生相同的位移场，则称该静态载荷为这一动态载荷在某一时刻的等效静态载荷。

从上面的定义通过有限元法可以得到等效静态载荷的计算公式。若不考虑阻尼，受动态载荷结构的运动方程可以表示为

$$M(b)\ddot{y}(t)+K(b)y(t)=r(t) \tag{7–1}$$

式中，$M(b)$ 为质量矩阵；$K(b)$ 为刚度矩阵；$y(t)$ 为位移；$r(t)$ 为结构所受外力。式（7–1）移项后可得

$$K(b)y(t)=r(t)-M(b)\ddot{y}(t) \tag{7–2}$$

根据位移场等效，所以静态载荷 f_{eq} 为

$$f_{eq}=K(b)y(t)=r(t)-M(b)\ddot{y}(t) \tag{7–3}$$

从式（7–3）中可以看出，等效静态载荷可以由外力和结构的惯性力求出。因此，等效静态载荷是设计变量的隐函数。尽管外力是沿某个固定的方向作用在物体上，由于惯性力 $M(b)\ddot{y}(t)$ 是不为零的，等效静态载荷可以是沿任意方向的。这样就可以更加精确地描述出结构在某一时刻的受力情况。

从式（7−3）中也可以看出，等效静态载荷只有在对结构进行瞬态分析之后才能计算得到。也就是说，通过等效静态载荷计算的是已知的位移场。从这个角度来说，等效静态载荷是没有任何意义的。但是，这里研究的不是利用等效静态载荷来预测动态载荷产生的变形情况，而是希望根据位移等效原理得到等效静态载荷，并将其应用于结构优化中。换句话说，这里的等效静态载荷是以设计为导向的载荷，而不是以分析为导向的载荷。接下来将介绍以设计为导向的载荷在动态响应优化领域的应用。

类似地，等效惯性力可以定义为

$$p_{eq}=M(b)\ddot{y}(t)=r(t)-K(b)y(t) \tag{7−4}$$

该式用于优化过程中加速度的定义。

7.2　利用等效静态载荷进行结构动态优化

目前，在离散的时域中求解式（7−1）是很容易实现的。因而，在离散的时域内求得等效静态载荷也是可以实现的。在u时刻，等效静态载荷可以在进行柔性多体动力学后求得

$$f_{eq}^{u}=K(b)y_{u}=r(t_{u})-M(b)\ddot{y}_{u},\qquad u=1,2,\cdots,q \tag{7−5a}$$

$$p_{eq}^{u}=M(b)\ddot{y}_{u}=r(t_{u})-K(b)y_{u},\qquad u=1,2,\cdots,q \tag{7−5b}$$

式中，q为所截取的时间点的个数，即等效静态载荷的数目。

大多数应用场合中不会引入速度约束，因此离散时间区域内的动态优化问题可表达为

$$\min\ \varphi(b) \tag{7−6a}$$

$$s.t.\ \ M(b)\ddot{y}_{u}+K(b)y_{u}=r(t_{u}),\quad u=1,2,\cdots,q \tag{7−6b}$$

$$g_{ju}(b,y_{u},\dot{y}_{u},\ddot{y}_{u})\leqslant 0,\quad j=1,2,\cdots,m;u=1,2,\cdots,q \tag{7−6c}$$

根据等效静态载荷算法，使用一系列等效静态载荷重复进行静态响应优化来代替直接求解式（7−6），则动态结构优化问题可以转化为

$$\min\ \varphi(b) \tag{7−7a}$$

$$s.t.\ \ K(b)y_{u}=f_{eq}^{u},\quad u=1,2,\cdots,q \tag{7−7b}$$

$$M(b)\ddot{y}_{u}=p_{eq}^{u},\quad u=1,2,\cdots,q \tag{7−7c}$$

$$g_{ju}(b,y_{u},\dot{y}_{u},\ddot{y}_{u})\leqslant 0,\quad j=1,2,\cdots,m;u=1,2,\cdots,q \tag{7−7d}$$

利用等效静态载荷法进行动态结构优化的算法如下：

赋初值 $p=0,b_{p}=b_{0}$；

将b_{p}代入式（7−1）进行瞬态分析；

计算时域内的等效静态载荷

$$f_{eq}^{u}=K(b_{p})y_{u},\qquad u=1,2,\cdots,q \tag{7−8a}$$

$$p_{eq}^{u}=M(b_{p})\ddot{y}_{u},\qquad u=1,2,\cdots,q \tag{7−8b}$$

若 $p=0$，转到式（7−5）。若 $p>0$，并且

$$\sum_{u=1}^{q}\left\| f_{eq}^{u}(p)-f_{eq}^{u}(p-1)\right\| < \varepsilon \tag{7-9}$$

优化完成。否则，转到式（7-5）。$f_{eq}^{u}(p)$ 是指 u 时刻、第 p 次循环的等效静态载荷矢量。

解决下列静态结构优化问题

$$\min \varphi\left(b_{p+1}\right) \tag{7-10a}$$

$$s.t.\ \ K\left(b_{p+1}\right)z_u = f_{eq}^{u},\quad u=1,2,\cdots,q \tag{7-10b}$$

$$M\left(b_{p+1}\right)a_u = p_{eq}^{u},\quad u=1,2,\cdots,q \tag{7-10c}$$

$$g_{ju}\left(b_{p+1},z_u\right)\leqslant 0,\qquad j=1,2,\cdots,m;u=1,2,\cdots,q \tag{7-10d}$$

$$b_{p+1,kL}\leqslant b_{p+1,k}\leqslant b_{p+1,kU},\ k=1,2,\cdots,n \tag{7-10e}$$

式中，z_u 和 a_u 分别是静态响应优化过程中等效静态载荷/惯性力产生的位移和加速度。

令 $p=p+1$，转到式（7-2）。

由式（7-2）～式（7-6），进行了一次完整的循环。式（7-5）中的等效静载/惯性力是固定的，位移和加速度分量将根据式（7-10）进行更新。等效静载是设计变量 y 和 $\ddot{y}$ 的函数，随着位移和加速度的更新，上述循环需要重复进行以获得新的等效静载/惯性力值，直到问题收敛。

在 OptiStruct 中，将整个时域[0，T]离散成 q 个时间点，由此获得的等效静态载荷数量也为 q，进行等效静态响应分析的工况也是 q，问题转变成 OptiStruct 中的 q 个静态工况下的结构优化问题，并且需要循环进行多次直到位移收敛，因此计算量是比较大的。OptiStruct 会默认进行智能约束屏蔽，降低约束的实际数目以缩小优化问题规模。

7.3 实例：四连杆机构的形状优化

本实例演示如何用 HyperMesh 建立四连杆机构（见图 7-2）的杆件结构优化，并用 OptiStruct 进行形状优化。通过定义 12 个形状变量来实现质量最小化的目的，约束应力使其在优化的过程中小于许可应力。左边的连杆是驱动连杆，其角速度为 50 rad/s，采用单位制（kg, N, cm, s）。

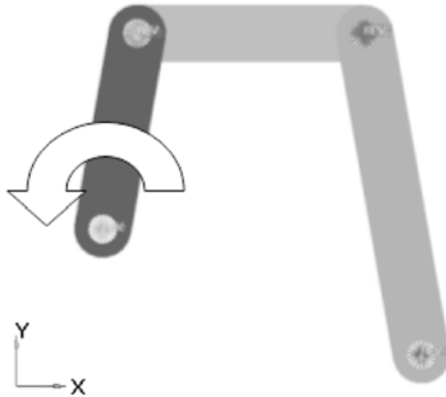


图 7-2　四连杆机构

本实例的优化问题描述如下：

√ 设计目标：质量最小化。

√ 设计约束：应力上限不超过许可应力。

√ 设计变量：3 个柔性体的形状设计变量。

在本例中，读者将：

√ 在 HyperMesh 中建立多体动力学瞬态分析工况。

√ 用 HyperView 对多体动力学计算结果进行后处理。

√ 在 HyperMesh 中用等效静态载荷法建立多体动力学优化问题。

√ 用 HyperView 对优化结果进行后处理。

STEP 01 启动 HyperMesh，设置 User Profile 并查看文件

（1）启动 HyperMesh，此时将弹出 User Profiles 对话框。

（2）选择 OptiStruct。

（3）单击 OK 按钮。这一步将载入 User Profiles，它包含了对应的模板、宏菜单和文件导入工具，并且为了生成 RADIOSS 和 OptiStruct 使用的批量数据格式模型，削减了 HyperMesh 的某些功能。

（4）从主菜单 File 的下拉菜单中选择 Open 命令。

（5）选择模型文件 4bar_design.hm，该文件位于 HyperWorks 安装目录<install_directory>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下。模型文件 4bar_design.hm 将加载到当前的 HyperMesh 中。

STEP 02 定义传动运动

在本实例中，通过在连接处定义 MOTNJ 来定义传动运动。然而，当前版本的 HyperMesh 并不支持 MOTNJ，因此需要手动输入卡片。

（1）进入 Analysis 页面， 单击 control cards。

（2）单击 BULK_UNSUPPORTED_CARDS。

（3）确保如图 7-3 所示的卡片输入。如果没有，则输入相应参数。

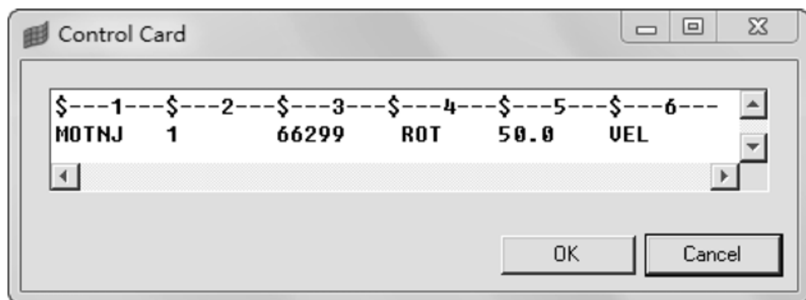


图 7-3 MOTNJ 的卡片格式

（4）在节点 66299 连接处（见图 7-4）定义了一个匀速角速度 (50 rad/s) 。

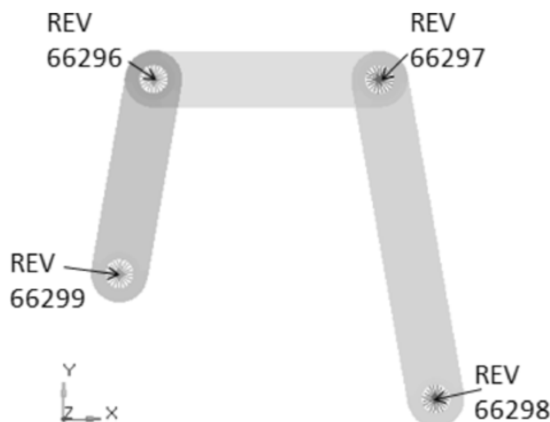


图 7-4　节点编号

（5）单击 OK 按钮。

（6）单击 return 按钮。

STEP 03 更新边界条件和传动运动

（1）进入 Analysis 页面，单击 loadsteps。确保将 type 切换到 multi-body dynamics。

（2）双击 name = 并选择 SUBCASE 1。

（3）勾选 MBSIM，并单击 = 按钮，选择 MBSIM。

（4）单击 update 按钮。

（5）单击 edit 按钮。

（6）拖动滚动条到卡片的底部，勾选 SUBCASE_UNSUPPORTED 复选框。

（7）在注释栏输入 MOTION = 1，如图 7-5 所示。

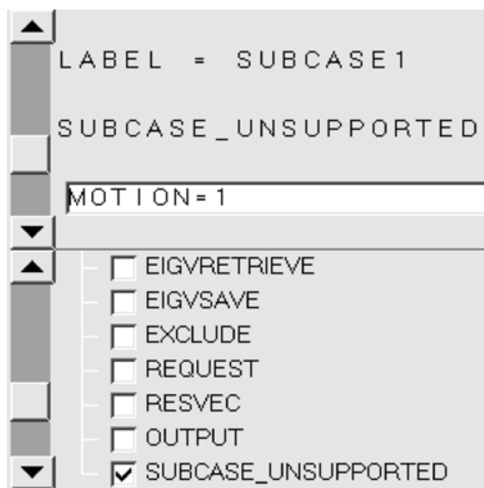


图 7-5　MOTION 卡片设置

（8）单击 return 按钮。

（9）单击 update 按钮。

（10）单击 return 按钮回到主菜单。

STEP 04 在 RADIOSS 中提交瞬态多体动力学模拟

（1）进入 Analysis 页面，单击 Radioss。

（2）将 export options 切换到 all。

（3）将 run options 切换到 analysis。

（4）将 memory options 切换到 memory default。

（5）单击 save as 按钮。

（6）选择 OptiStruct 模型文件的写入路径，OptiStruct 运行时产生的文件都将置于该路径下，在 File name 处输入模型文件的文件名 4bar_design_analysis.fem。将 options 区域设为空白。

（7）单击 Save 按钮。注意 input file 栏的文件名和文件路径。

（8）单击 RADIOSS。

如果分析顺利完成，DOS 窗口将没有错误信息。Processing complete 信息出现在窗口中表明分析已完成。

STEP 05 对瞬态多体动力学分析结果进行后处理

一旦在命令窗口看到 Process completed successfully，就关闭 DOS 窗口。

（1）单击 Radioss 面板中的 HyperView 按钮。自动将当前运算的结果文件加载到 HyperView 中。将有一个信息弹出框提示成功加载模型文件和结果文件。

（2）单击 Close 按钮关闭 Message Log 窗口。

（3）单击工具栏中的 Contour 按钮 。

（4）单击 Result type 下拉菜单， 选择 Element Stresses (2D & 3D) (t)。

（5）单击 Apply 按钮。

（6）单击 Edit Legend 并切换 Type 到 Dynamic scale。也可以改变其他的选项来得到想要的图例。

（7）单击 Page Layout 按钮，选择两个竖直窗口模式。

（8）单击右侧的空白窗口使其成为当前窗口。

（9）单击 Client Selector 下拉菜单，选择 HyperGraph 2D 。

（10）单击 Window 1 使其成为当前窗口。

（11）单击 Measure 。

（12）在 Measure Groups 列表中，选择 Dynamic MInMax Result。

（13）在 Resolved in 列表中单击 Max，在 Create curve 下方将 Place curve on 切换成 Existing Plot。

（14）单击 Live link，选择 Window 2 并单击 Apply 按钮，这将绘出最大 von mises 应力，如图 7-6 所示。

现在这个文件将被保存为一个模板，该模板将在查看优化结果时调用。

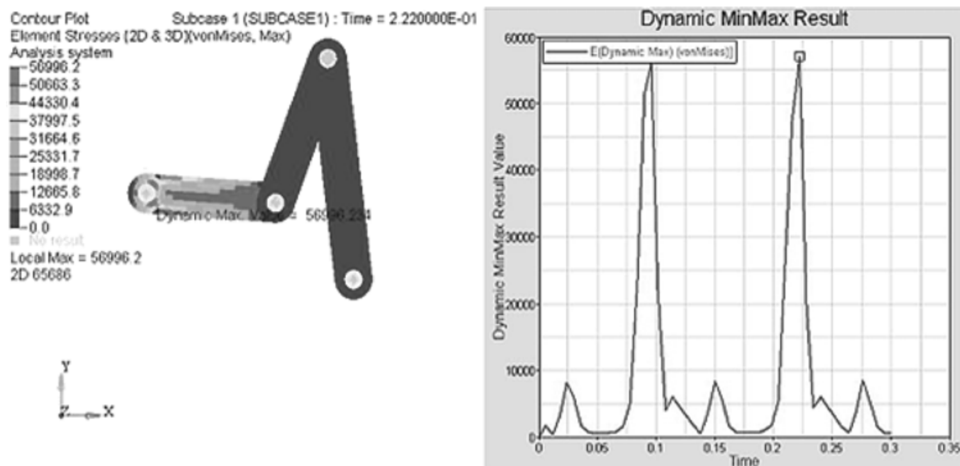


图 7-6　多体动力学分析应力结果（Max = 56996 N/cm²）

（15）从 File 下拉菜单中选择 Save Session File As，将 Save as type 切换到 Report definition (*.tpl)。

（16）输入 Stress_report.tpl 并单击 Save 按钮。

（17）使用“页面导航”按钮 回到第一页和 HyperMesh 客户端。

STEP 06 为等效静态载荷优化中的结构分析定义边界条件

（1）单击 Load Collectors 按钮 。

（2）选择 create 子面板。

（3）单击 name = 并输入 BCforOpt。

（4）切换 card image 选项至 no card image。

（5）单击 create 按钮。

（6）单击 return 按钮返回主菜单。

（7）单击下拉菜单 Preferences，选择 Graphics。

（8）勾选 coincident picking 复选框，如图 7-7 所示。

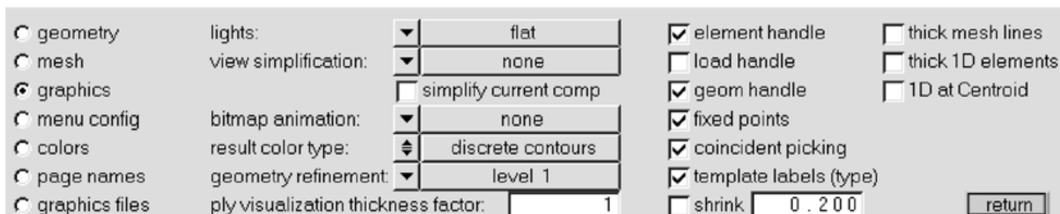


图 7-7　重复节点选择测试

（9）单击 return 按钮回到主菜单。

（10）进入 Analysis 页面，单击 constraints。

（11）为了消除刚体位移，应约束各柔性体界面节点（见图 7-8）的所有自由度（1～

6）。确保 constraints 面板中的 dof1～dof6 全部勾选。

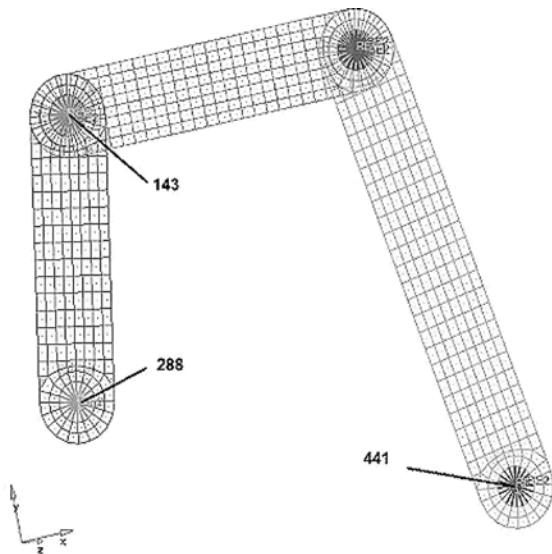


图 7-8　约束节点以消除刚体位移

（12）在图形区域，单击左侧组件刚性单元的中心，将在此处看到两个节点号，选择节点号为 288 的节点。

（13）在图形区域，单击中间组件刚性单元的中心并选择节点号为 143 的节点。

（14）在图形区域，单击右侧组件刚性单元的中心并选择节点号为 441 的节点。

（15）确保 Load Type= 为 SPC。

（16）单击 create 按钮。

STEP 07 更新工况

（1）进入 Analysis 页面，单击 loadsteps。

（2）将 type 切换到 multi-body dynamics。

（3）双击 name = 并选择 SUBCASE 1。

（4）单击 SPC = 并选择 BCforOpt。

（5）勾选 MBSIM，单击 = 按钮并选择 MBSIM。

（6）单击 update 按钮。

（7）单击 return 按钮返回主菜单。

STEP 08 定义形状变量

本模型已经创建了形状变化。更多关于形状变化创建的相关内容，请参考 HyperMorph 使用手册。本节将在预先定义好的形状变形的基础上创建形状设计变量。

（1）进入 Analysis 页面，单击进入 optimization 面板。

（2）单击 shape。

（3）选择 desvar 子面板。

（4）将 single desvar 切换到 multiple desvars。

（5）单击上方带青绿色边框的 shapes 按钮，选择 all，单击 select。

（6）单击 return 按钮。

（7）在 lower bound 处输入−1.0，在 upper bound 处输入 1.2，如图 7−9 所示。

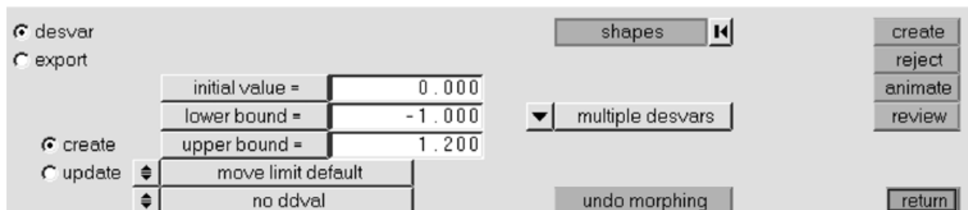


图 7−9 形状变量的定义

（8）单击 create 按钮。

（9）创建 12 个形状设计变量。

（10）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 09 定义响应

定义两个响应，分别为作为目标的质量响应和作为约束的应力响应。

（1）进入 optimization 面板，选择 responses 面板。

（2）单击 response = 并输入 Mass。

（3）单击响应类型选择按钮，从弹出的菜单中选择 Mass。

（4）单击 create 按钮。

以上操作创建了一个质量响应。

（5）单击 response = 并输入 Stress。

（6）单击响应类型选择按钮，从弹出的菜单中选择 static stress。

（7）单击带青绿色边框的 props 按钮，选择 Middle、Left 和 Right。

（8）单击 select 按钮。

（9）选择应力类型为 von mises，选择 both surfaces。

（10）单击 create 按钮。

以上操作创建了一个应力响应。

（11）单击 return 按钮回到 optimization 面板。

STEP 10 定义目标函数

优化目标为质量最小化。

（1）进入 objective 面板（从 Analysis 页面下的 optimization 面板进入）。

（2）单击面板左上角的切换按钮，从弹出的菜单中选择 min。

（3）单击 response = 并从响应列表中选择 Mass。

（4）单击 create 按钮。

这样就定义了一个目标函数。

（5）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 11 定义应力约束

定义应力响应的上限约束。

（1）选择 dconstraints 面板（从 Analysis 页面下的 optimization 面板进入）。

（2）单击 constraint = 并输入 Constr。

（3）勾选 upper bound =复选框。

（4）单击 upper bound = 并输入 30000。

（5）单击 response = 并从响应列表中选择 Stress。面板中将出现一个 loadsteps 按钮。

（6）单击 loadsteps 按钮。

（7）勾选 SUBCASE1 复选框，单击 select 按钮。

（8）单击 create 按钮。

这样就定义了一个应力约束。这个约束将使得 SUBCASE1 工况下的最大应力小于 30000.0 N/cm^2。

（9）两次单击 return 按钮，回到主菜单。

STEP 12 保存数据

（1）单击 File 下拉菜单，单击 Save As 中的 Model。

（2）选择保存路径，在 File name 处输入 4bar_design_opt.hm。

（3）单击 Save 按钮。

STEP 13 在 OptiStruct 中提交等效静态载荷优化作业

（1）进入 Analysis 页面，单击 OptiStruct。

（2）将 export options 选项切换到 all。

（3）将 run options 选项切换到 optimization。

（4）将 memory options 选项切换到 memory default。

（5）单击 input file 后面的 save as 按钮。

（6）选择 OptiStruct 模型文件的写入路径，OptiStruct 运行时产生的文件都将置于该路径下，在 File name 处输入模型文件的文件名 4bar_design_opt.fem。

（7）单击 Save 按钮。文件名和保存路径将显示在 input file 区域。

（8）单击 OptiStruct。

如果窗口中没有报告错误信息，说明该模型没有问题。优化完成之后窗口中将出现

Processing complete 的提示。

（9）如果作业成功执行，将会在前面指定的工作路径下生成结果文件。除了一般的 out 文件外，还将出现一个名为 4bar_design_user.eslout 的文本文件。可以从这个文件中看到等效静态载荷优化的过程。

STEP 14 查看最后一个迭代步的应力结果

看到命令窗口中出现 Process completed successfully 之后关闭 DOS 窗口。

（1）单击 OptiStruct 面板中的 HyperView 按钮，或者从“开始”菜单打开 HyperView。

（2）单击 Reports 按钮，并单击 Add 按钮。

（3）选择模板文件 Stress_report.tpl 并单击 Open 按钮。

（4）在 GRAPHIC_FILE_1 和 RESULT_FILE_1 处选择优化路径下的 4bar_design_opt_mbd_0#.h3d（# 代表最后一个迭代步）。

将弹出一个窗口提示 Element Stresses（2D & 3D）结果不存在，这是因为多体动力学计算中应力结果就叫 Stress。

（5）关闭 Message Log 窗口。

（6）单击第一个窗口使其成为当前窗口。

（7）单击 Contour 工具按钮。

（8）单击 Result type 下拉菜单并选择 Stress (t)。

（9）单击按钮查看动画，如图 7-10 所示。

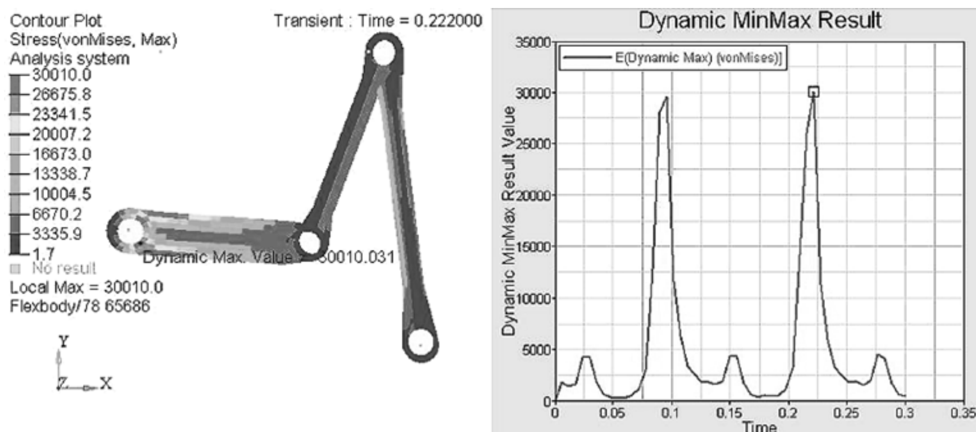


图 7-10 新设计的应力结果 (Max < 30000 N/cm^2)

STEP 15 显示形状改变云图

（1）单击按钮插入新的一页。

（2）单击 Load Results 按钮 并打开优化路径下最后一次迭代结果文件 4bar_design_opt_des_0#.h3d。

（3）单击 Apply 按钮。

（4）单击 Contour 按钮 。

（5）单击 Result type 下拉菜单并选择 Shape Change (v)。

（6）单击 Apply 按钮，得到如图 7-11 所示的形状变化云图。

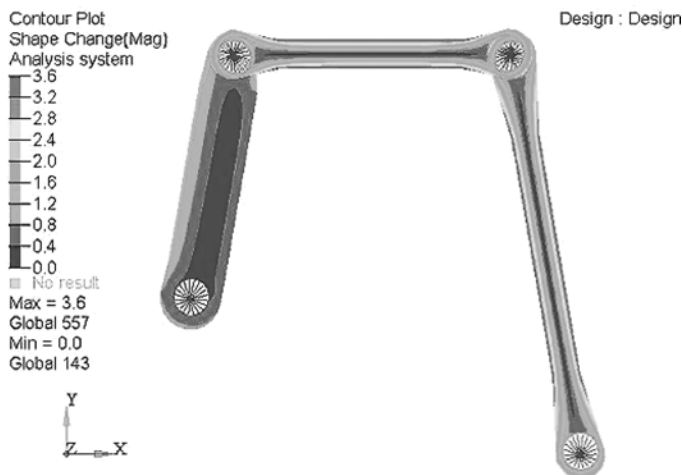


图 7-11　形状变化云图

（7）打开文件 4bar_design_opt.dsvar，查看优化过程中设计变量的变化情况。

可以看到右边和中间部件的设计变量已达到极限值 1.2，表明最大限度地减少这两个部件的质量是降低应力的关键。

7.4　实例：挖掘机工作臂的拓扑优化

本实例演示如何用等效静态载荷法建立挖掘机工作臂（见图 7-12）多体动力学系统的优化。在 HyperMesh 中建立模型，在 OptiStruct 中进行拓扑优化计算。优化的目标是在保证质量不超过许可质量的情况下，最大限度地提高挖掘机下臂的刚度。模型的单位为 kg, N, m 和 s。

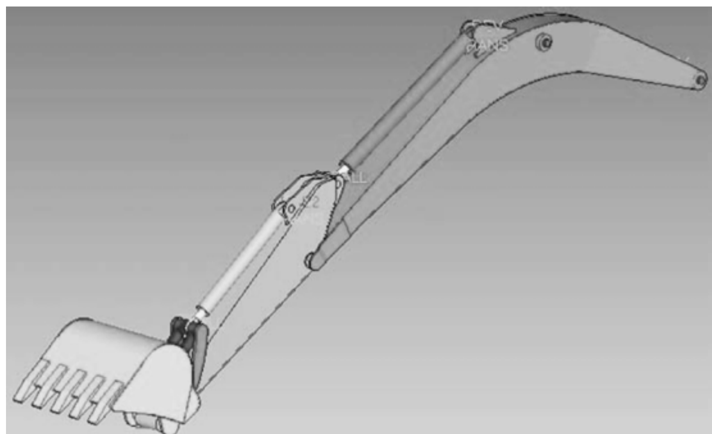


图 7-12　挖掘机工作臂模型

本实例的优化问题描述如下：

√ 目标：最大限度地降低一个静态载荷工况中的最大应变能。

√ 约束：指定体积分数上限。

√ 设计变量：挖掘机下臂（柔性体）的单元密度。

在本实例中，作者将：

√ 查看 MBD 瞬态分析结果。

√ 将刚体重新定义成柔性体。

√ 用等效静态载荷法建立并运行多体动力学系统的拓扑优化。

√ 用 HyperView 对优化结果进行后处理。

STEP 01 启动 HyperMesh，设置 User Profile 并查看文件

（1）启动 HyperMesh，此时将弹出 User Profiles 对话框。

（2）选择 OptiStruct。

（3）单击 OK 按钮。

这一步将载入 User Profiles，它包含了对应的模板、宏菜单和文件导入工具，并且为了生成 RADIOSS 和 OptiStruct 使用的批量数据格式模型，削减了 HyperMesh 的某些功能。

（4）从主菜单 File 的下拉菜单中选择 Open 命令。

（5）选择模型文件 Excavator_MBD.hm，该文件位于 HyperWorks 安装目录<install_directory>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下。

（6）模型文件 Excavator_MBD.hm 将加载到当前的 HyperMesh 中。

STEP 02 在 RADIOSS 中提交瞬态多体动力学模拟

在模型 Excavator_MBD.hm 中已经定义了挖掘机的多体动力学问题，所有的体都被定义成刚体。下面将提交计算并查看动画。

（1）进入 Analysis 页面，单击 Radioss。

（2）将 export options 切换到 all。

（3）将 run options 切换到 analysis。

（4）将 memory options 切换到 memory default。

（5）单击 save as 按钮。

选择 OptiStruct 模型文件的写入路径，OptiStruct 运行时产生的文件都将置于该路径下，在 File name 处输入模型文件的文件名 Excavator_MBD_analysis.fem。

建议 OptiStruct 输入文件的扩展名是.fem。

options 区域设为空白。

（6）单击 Save 按钮。

注意 input file 栏的文件名和文件路径。

（7）单击 RADIOSS。

如果分析顺利完成，DOS 窗口将没有错误信息。Processing complete 信息出现在窗口中

表明分析已完成。

STEP 03 对瞬态多体动力学分析结果进行后处理

一旦在命令窗口看到 Process completed successfully，就关闭 DOS 窗口。

（1）单击 Radioss 面板中的 HyperView 按钮。自动将当前运算的结果文件加载到 HyperView 中。将有一个信息弹出框提示成功加载模型文件和结果文件。

（2）单击 Close 按钮关闭 Message Log 窗口。

（3）单击 ▶ 按钮查看动画。

（4）关闭 HyperView 并返回 HyperMesh。

STEP 04 将刚体重新定义成柔性体

在这一步将定义下臂的拓扑优化问题。原始模型中下臂是一个刚体，为了优化，需要将其转变为柔性体。

（1）进入 Analysis 页面，单击 bodies。

（2）选择 update 单选按钮。

（3）双击 Body=按钮并选择 Lower_Arm。

（4）单击 review 按钮。

下臂将会高亮显示。可以看到 type= PFBODY，表明下臂为一刚体。下面将把它更新为柔性体，并为其定义拓扑优化问题。

（5）单击 type=按钮并选择 PFBODY。

（6）在 nmodes=处输入 20，以使 CMS 方法中包含的模态阶数增至 20，如图 7-13 所示。

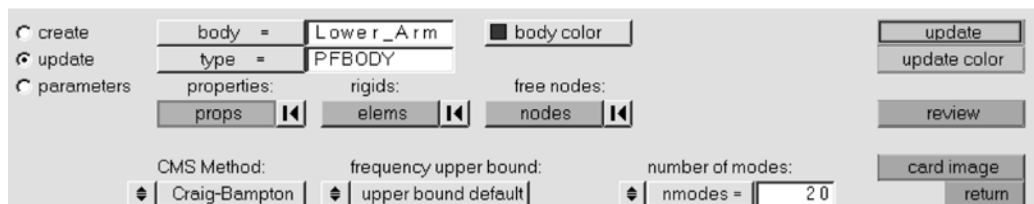


图 7-13 柔性体定义

（7）单击 update 按钮更新下臂的体类型。左下角的信息提示表明体类型已经更新至新类型。

（8）单击 return 按钮。

STEP 05 定义拓扑设计变量

（1）进入 Analysis 页面，选择 optimization 面板。

（2）选择 topology 进入拓扑面板。

（3）选择 create 子面板。
（4）单击 DESVAR=按钮，输入 L_Arm_Topology 并按〈Enter〉键。
（5）单击 props 按钮并从属性列表中选择 lowerarm; 单击 select。
（6）选择 type: PSOLID。
（7）单击 create 按钮。
（8）激活 parameters 单选按钮。
（9）单击 review 按钮。
（10）选择 L_Arm_Topology。
（11）切换 minmemb off 至 mindim= 并输入 0.05。
（12）单击 update 按钮。
这将为拓扑优化问题施加一个 0.05m 的最小尺寸控制。
（13）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 06 定义响应

这里定义两个响应，分别为作为目标的应变能响应和作为约束的体积分数响应。
（1）进入 optimization 面板，选择 responses 面板。
（2）单击 response = 并输入 Volfrac。
（3）单击 response type 并从弹出窗口中选择 Volumefrac。
（4）将 Total 切换到 by entity。
（5）单击带有青绿色边框的 props 按钮并选择 lowerarm。
（6）单击 create 按钮。
这为拓扑设计区域定义了一个体积分数响应。
（7）单击 response = 并输入 Comp。
（8）单击 response type 并从弹出窗口中选择 compliance。
（9）确保实体选择选项为 Total。
（10）单击 create 按钮。
这将创建一个应变能响应。
（11）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 07 定义参考目标

（1）单击 obj reference。
（2）在 dobjref= 区域输入 MAX_Comp。
（3）勾选 pos reference; 输入 1.0。
（4）勾选 neg reference; 输入 −1.0。
（5）单击 response 并选择 Comp。
（6）将 loadsteps 选项设为 Total，以确保参考目标包含等效静态载荷法中的所有工况的应变能。

（7）单击 create 按钮。

（8）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 08 定义目标函数

目标是将等效静态载荷工况中的最大应变能最小化。

（1）进入 objective 面板。

（2）单击最左侧的按钮并选择 minmax。

（3）单击 dobjrefs 并选择 MAX_Comp。

（4）单击 create 按钮。

（5）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 09 定义体积分数的约束

为之前定义的体积分数响应定义一个约束上限。

（1）进入 dconstraints 面板（从 Analysis 页面的 optimization 面板进入）。

（2）单击 constraint = 并输入 Vol_Constr。

（3）勾选 upper bound =复选框。

（4）单击 upper bound = 并输入 0.5。

（5）单击 response = 并从响应列表中选择 Volfrac。

（6）单击 create 按钮。

这就为响应“Volfrac.”定义了一个约束，该约束使得设计空间的体积分数小于 0.5。

（7）两次单击 return 按钮返回主菜单。

STEP 10 保存数据

（1）单击 File 下拉菜单，单击 Save As 中的 Model。

（2）选择保存路径，在 File name 处输入 excavator_MBD_Topology.hm。

（3）单击 Save 按钮。

STEP 11 在 OptiStruct 中提交等效静态载荷优化作业

（1）进入 Analysis 页面，单击 OptiStruct。

（2）将 export options 选项切换到 all。

（3）将 run options 选项切换到 optimization。

（4）将 memory options 选项切换到 memory default。

（5）单击 input file 后面的 save as 按钮。

（6）选择 OptiStruct 模型文件的写入路径，OptiStruct 运行时产生的文件都将置于该路

径下，在 File name 处输入模型文件的文件名 excavator_MBD_Topology.fem。

（7）单击 Save 按钮。

文件名和保存路径将显示在 input file 区域。

（8）单击 OptiStruct。

如果窗口中没有报告错误信息，说明该模型没有问题。优化完成之后窗口中将出现 OPTIMIZATION HAS CONVERGED 的提示。

如果作业成功执行，将会在前面指定的工作路径下生成结果文件。除了一般的 out 文件，还将出现一个名为 excavator_MBD_Topology.eslout 的文本文件。可以从这个文件中看到等效静态载荷优化的过程。

优化所需的时间将视具体的硬件情况而定。

STEP 12 查看最后一个迭代步的单元密度

看到命令窗口中出现 OPTIMIZATION HAS CONVERGED 之后关闭 DOS 窗口。

（1）单击 OptiStruct 面板中的 HyperView 按钮。

（2）打开 HyperView 并加载结果。有一个信息弹出框提示成功将模型文件和结果文件加载到 HyperView 中。

（3）单击 Close 按钮关闭信息弹出框。

（4）在如图 7-14 所示的 Results Browser 中选择最后一个迭代步以加载拓扑优化的结果。

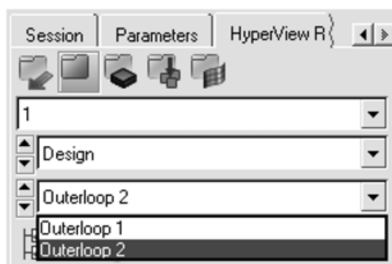


图 7-14 选择优化结果

（5）单击 Iso Value 工具按钮 。

（6）将 Result type 设为 Element densities (s)。

（7）单击 Apply 按钮查看单元密度值超过 Current value 的单元，如图 7-15 所示。

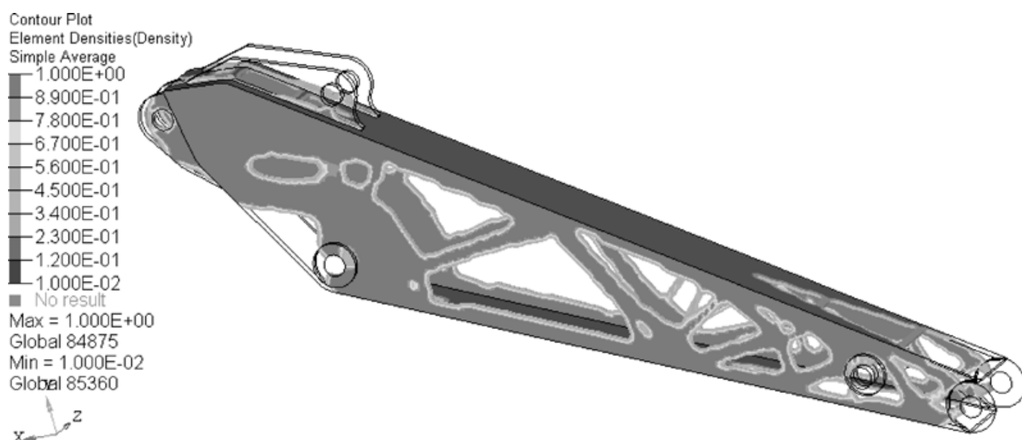


图 7-15 下臂拓扑优化结果的等值图

（8）在 Current value 处输入 0.5。

（9）确保 Show values 设为 Above。

（10）利用左边的模型浏览器，只显示组件 Lower_Arm。

（11）也可以拖动滚动条改变单元密度的当前值，以查看不同密度阈值下的材料分布。

7.5 小结

OptiStruct 中的等效静态载荷法用于运动机构零件的结构减重优化，可以智能考虑主要工况，提供准确的边界条件，实现运动仿真和结构优化的一体化，具有独特的技术优势，但等效静态载荷法的迭代次数是单次静态载荷优化方法的数倍，计算时间较长。

等效静态载荷法也可用于非线性的结构优化，即把非线性分析结果的动态载荷迭代历程或者时间历程转化成多组等效静态载荷，具有广泛的应用前景。

第 8 章

热、疲劳及非线性优化实例



OptiStruct 结构优化求解的每个迭代步都需要进行一次有限元计算，因此，是否具有该分析类型的有限元求解能力，是 OptiStruct 能否对该类型问题进行优化的前提条件。

OptiStruct 和 Radioss/Bulk（关于 Radioss/Bulk 的详细技术请参看本丛书的 Radioss 分册）采用相同的 Bulk 文件格式和求解模块。目前，Radioss/Bulk 支持如下求解系列：

√ 线性静力分析。
√ 模态分析。
√ 屈曲分析。
√ 惯性释放分析。
√ 频率响应和瞬态分析。
√ 随机响应分析。
√ 疲劳分析。
√ 热分析。
√ 几何非线性/接触非线性分析。

OptiStruct 支持对大部分 Radioss/Bulk 的分析类型进行优化，更多的优化技术还在开发中。本章以 3 个实例帮助读者熟悉如何在 HyperMesh 中进行热、疲劳和非线性优化。

本章重点知识

8.1 实例：电子器件的热传导优化
8.2 实例：连杆的疲劳特性优化
8.3 实例：保险杠的碰撞性能优化
8.4 小结

8.1 实例：电子器件的热传导优化

在本实例中，介绍电子器件（见图 8-1）的形状优化。箔的热通量为 q=8000W/m。大气温度为 10˚C，其传热系数为 H = 40 W/（m^2 • K）。热传导系数为 K = 221W/（m • K）。通过求解热传导和对流载荷工况确定电子器件的温度分布。

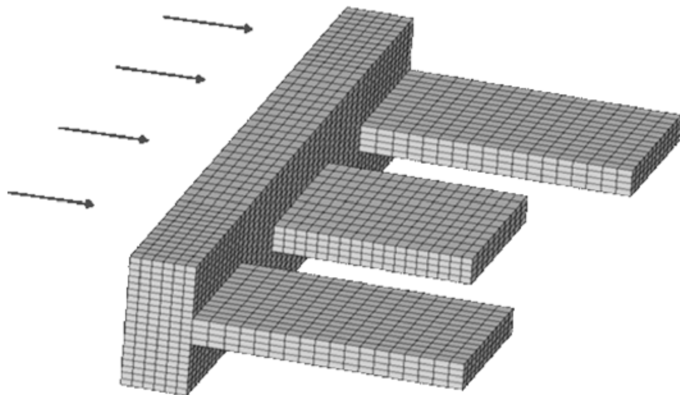


图 8-1　有限元模型

本实例的优化问题描述如下。

√ 设计变量：形状设计变量。
√ 优化目标：最大限度降低底座中心的温度。
√ 设计约束：体积< 1.0e−5m^3。

STEP 01 加载 OptiStruct 用户配置文件并导入模型

（1）启动 HyperMesh。

此时将弹出 User Profiles 对话框。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（3）单击 OK 按钮。

这一步将载入 User profiles，它包含了对应的模板、宏菜单和文件导入工具，并且为了生成 OptiStruct 模型，削减了 HyperMesh 的某些功能。

User Profiles 对话框也可从 Preferences 下拉菜单进入。

（4）从 File 下拉菜单中选择 Import 中的 Solver Deck。

（5）将 File type 设置为 OptiStruct。

（6）在 File 处单击“打开”按钮。弹出一个 Select OptiStruct file 的窗口。

（7）选择文件 fins.fem，该文件位于 HyperWorks 安装目录<install_directory>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下。

（8）单击 Open 按钮。

file 中将显示文件名 fins.fem。

（9）单击 Apply 按钮。

模型数据 fins.fem 将加载到当前 HyperMesh 中。

（10）单击 Close 按钮关闭信息窗口。

STEP 02 用 HyperMorph 创建形状扰动

用 HyperMorph 中的 Freehand 模块创建形状扰动。更多关于 HyperMorph 的功能描述请参考 HyperMesh 帮助的 HyperMorph 部分。

（1）进入 Analysis 页面，选择 optimization 面板。

（2）单击 HyperMorph。

（3）单击 Freehand。

（4）在面板左边的选择按钮中选择 move nodes 子面板。

（5）将运动形式切换为 translate。

（6）输入移动的距离：$x = 0.03$、$y = 0.0$、$z = 0.0$，只沿着 X 方向延长箔片。

（7）选择 moving nodes。

（8）单击高亮显示的 nodes 按钮并从弹出窗口中选择 by sets。

（9）勾选节点集 sh1_move 复选框并单击 select。

所选节点将在屏幕中高亮显示。

（10）选择 fixed nodes。

（11）单击高亮显示的 nodes 按钮并从弹出窗口中选择 by sets。

（12）勾选节点集 sh1_fix 复选框并单击 select。

所选节点将在屏幕中高亮显示。

（13）选择 affected elements。

（14）单击高亮显示的 elems 按钮并从弹出窗口中选择 by sets。

（15）勾选单元集 set sh1_elem 复选框并单击 select。

所选单元将在屏幕中高亮显示。

（16）单击 morph 按钮。

沿 X 方向延长箔片。

（17）切换到 save shape 子面板。

（18）在 name=处输入 sh1 并将切换按钮切换到 as node perturbations。

（19）单击 Save 按钮。

创建了一个形状扰动 shp1。

（20）单击 undo all。

（21）重复第（5）～（16）步，为原始模型创建形状扰动 sh2 和 sh3。相应的节点集(sh2_move/fix、sh3_move/fix)和单元集(sh2_elem、sh3_elem)已定义好。

（22）两次单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 03 创建形状设计变量

（1）进入 shape 面板。

（2）选择 desvar 子面板。
（3）将设计变量选项从 single desvar 切换到 multiple desvars。
（4）单击高亮显示的 shapes。
（5）勾选 sh1、sh2 和 sh3 复选框并单击 select。
（6）输入 initial value = 0.0，lower bound = −1.0，upper bound = 2.0。
（7）单击 create 按钮。
创建了 3 个形状设计变量。
（8）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 04 创建响应

创建一个为约束服务的体积响应。
（1）进入 responses 面板。
（2）在 response =处输入 volume。
（3）单击 response type 切换按钮并从弹出框中选择 volume。确保体积选项选择 total。
（4）单击 create 按钮。
将箔的总体积定义成了一个响应。
（5）在 response =处输入 temperature。
（6）在 response type 处选择 temperature。
（7）单击 nodes 按钮并选择 by id，输入节点 id 号 2450，按〈Enter〉键。
（8）单击 create 按钮。
创建了 2450 号节点的温度响应。
（9）两次单击 return 按钮回到 Analysis 页面。

STEP 05 定义优化约束

（1）进入 dconstraints 面板。
（2）在 constraint = 处输入 vol。
（3）单击 response =并选择 volume。
（4）勾选 upper bound 并输入 1.0e−5。
（5）单击 create 按钮。
这就创建了一个上限为 1.0e−5 的体积约束。

STEP 06 定义目标函数

（1）进入 objective 面板。
（2）将选择按钮切换到 min。
（3）单击 response =并选择 temperature。
（4）单击 loadsteps 并选择 heat transfer subcase。

（5）单击 create 按钮。

这就创建了一个最大限度降低 2450 号节点处温度的目标函数。

STEP 07 定义 SHAPE 卡片

默认设置下_s#.h3d 文件中只有分析结果。为了在 HyperView 中查看形状改变后的分析结果，需要定义一个 SHAPE 卡片。

（1）进入 Analysis 页面，选择 control cards 面板。

（2）3 次单击绿色的 next 按钮并选择 SHAPE。

（3）将 format 设为 h3d，TYPE 和 OPTION 设为 ALL。

（4）两次单击 return 按钮返回主菜单。

STEP 08 提交作业

（1）进入 Analysis 页面，单击 OptiStruct。

（2）单击 input file 后面的 save as 按钮。

（3）选择 OptiStruct 模型文件的写入路径，OptiStruct 运行时产生的文件都将置于该路径下，在 File name 处输入模型文件的文件名 fins_opt.fem。

（4）单击 Save 按钮。

（5）文件名和保存路径将显示在 input file 区域。

（6）将 memory options 选项切换到 memory default。

（7）将 run options 选项切换到 optimization。

（8）将 export options 选项切换到 custom。

（9）单击 OptiStruct。

如果作业成功执行，将会在前面指定的工作路径下生成结果文件。如果存在错误，可以从 fins_opt.out 文件中查看相关错误信息。在查看结果之前确保分析已完成。

STEP 09 用 HyperView 对结果进行后处理

以下操作步骤演示如何在 HyperView 中查看优化后的温度分布云图。

（1）单击 OptiStruct 面板里的 HyperView 按钮，启动 HyperView。

（2）在 Load model and results 面板里，模型文件和结果文件均加载 fins_opt_s1.h3d。

（3）单击 Apply 按钮。

加载了包含分析结果和优化结果的 h3d 文件。

（4）确保在 HyperView 的 Results Browser 中选择第 0 个迭代步。

（5）进入 Contour 面板。

（6）Result type 选择 Grid Temperatures (s)并单击 Apply 按钮。

显示优化前电子器件的温度分布云图。

（7）在 Results Browser 中选择最后一个迭代步。

（8）在 Contour 面板，将 Results type 设置为 Shape Change (v)并单击 Apply 按钮。

加载最后优化的一个迭代步的形状。

（9）Result type 选择 Grid Temperatures (s)并单击 Apply 按钮。

显示优化后电子器件的温度分布云图。

图 8−2 给出了优化前后电子器件上的温度分布云图。

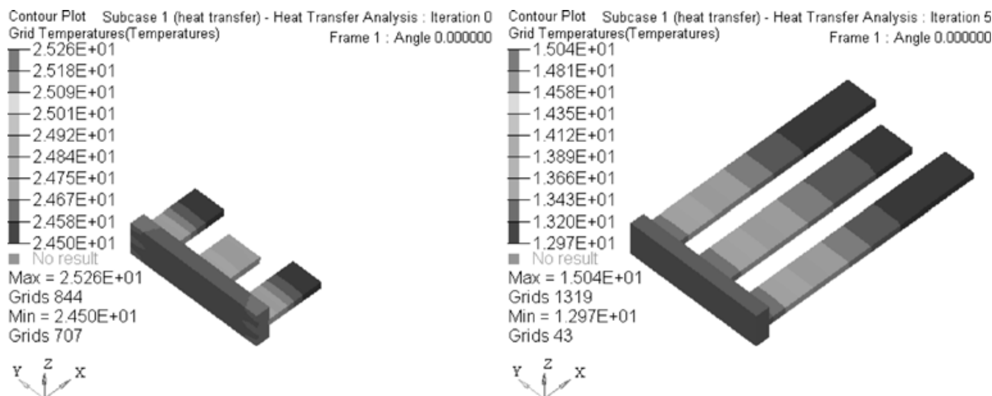


图 8−2　优化前后电子器件上的温度分布云图

8.2　实例：连杆的疲劳特性优化

本实例介绍连杆的自由形状疲劳优化。本次优化的目标是通过改变几何形状来延长连杆的疲劳寿命。

连杆受到如图 8−3 所示的制动力和垂直力的作用。两个载荷的加载时间为 279s，频率为 1Hz，如图 8−4 所示。连杆的材料为钢材，其 S−N 曲线如图 8−5 所示。

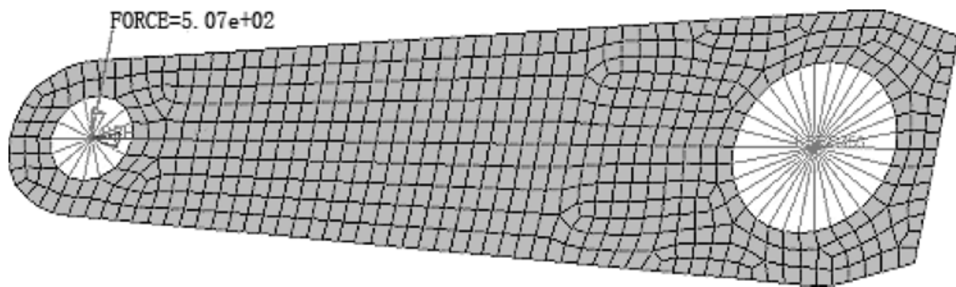


图 8−3　连杆疲劳优化模型

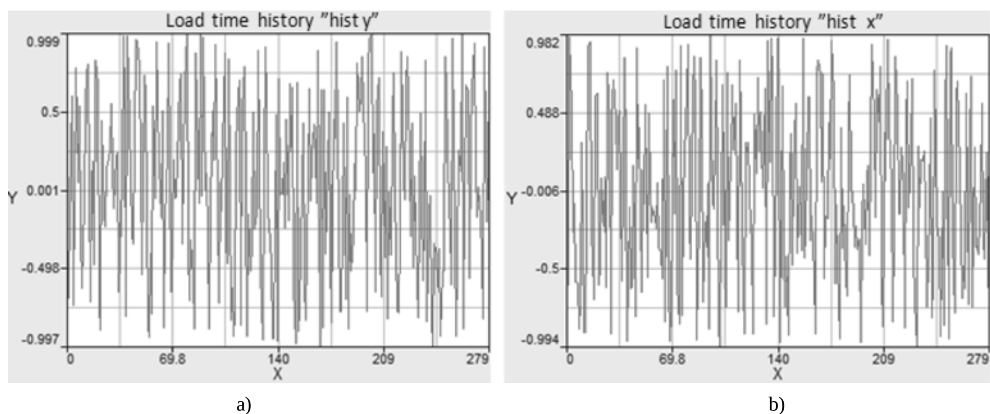
在本实例中，读者将：

√ 利用疲劳流程树（FPM）建立 S−N 疲劳问题。

√ 在 HyperMesh 中定义自由形状优化问题。

√ 用 HyperView 对自由形状疲劳优化结果进行后处理。

本实例需要使用的文件有：tarm_fatigue.fem, tarm_loadY.csv and tarm_loadX.csv。



a) b)

图 8-4 时间历程图像

a) 垂直力加载时间历程 b) 制动力加载时间历程

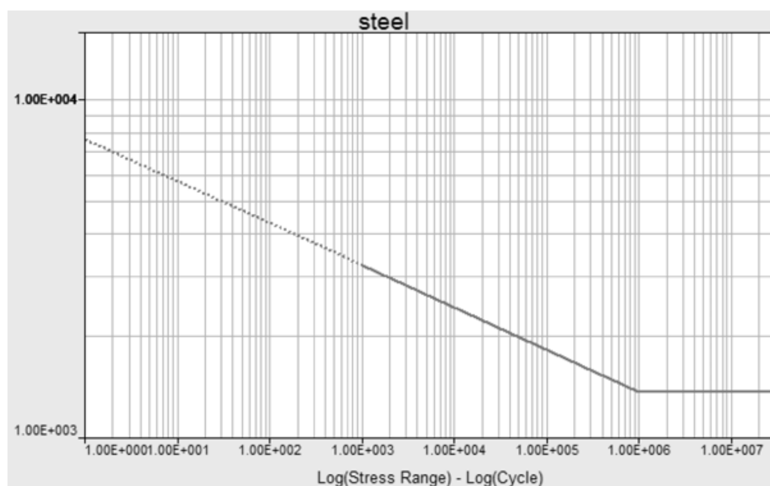


图 8-5 钢材的 S-N 曲线

这些文件位于目录<install_directory>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下，将其复制至工作路径下。

下面利用疲劳流程树（FPM）建立 S-N 疲劳问题。

STEP 01 启动 HyperMesh 和 Process Manager

（1）启动 HyperMesh。

此时将弹出 User Profiles 对话框。也可通过 Preferences 下拉菜单进入 User Profiles 对话框。

（2）选择 OptiStruct。

（3）单击 OK 按钮。

（4）单击 Tools 下拉菜单，选择 Fatigue Process，选择 Create New。

（5）在 New Session Name 处输入一个新的名字，为 Working Folder 指定一个工作路径，

并单击 create 按钮。

这将为当前加载的疲劳流程模板创建一个新的工作路径。

当完成上述操作后，ProcessManager 选项卡中将显示疲劳流程树（见图 8-6），并选中了 Import File。

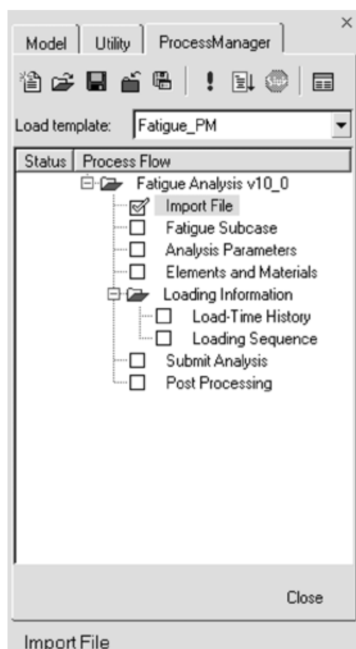


图 8-6　ProcessManager 选项卡

STEP 02　导入模型

（1）从 Model file type 下拉菜单中选择 RADIOSS（Bulk Data）。

（2）单击 Open Model file 按钮，弹出 Open file 对话框。

（3）选择模型文件 tarm_fatigue.fem。

（4）单击 Import 按钮，如图 8-7 所示。

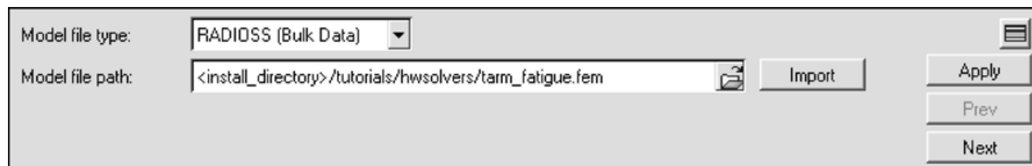


图 8-7　模型导入

这将导入连杆模型。这个模型中定义了两个静态工况、单元集、材料和属性等。

（5）单击 Apply 按钮。

这将引导用户到疲劳流程树的下一个环节 Fatigue Subcase，如图 8-8 所示。

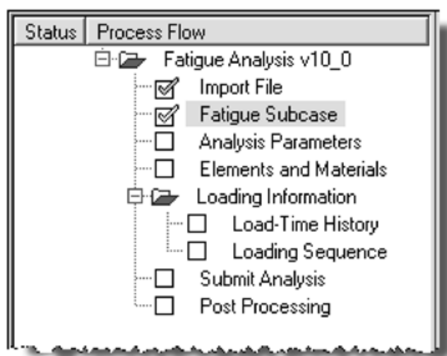


图 8-8　疲劳流程树

STEP 03 创建疲劳工况

（1）确保选中疲劳流程树中的 Fatigue Subcase。
（2）在 Create new fatigue subcase 处输入 fatsub。
（3）单击 Create 按钮。
（4）在 Select existing fatigue subcase 处选择刚刚创建的疲劳工况 fatsub，如图 8-9 所示。

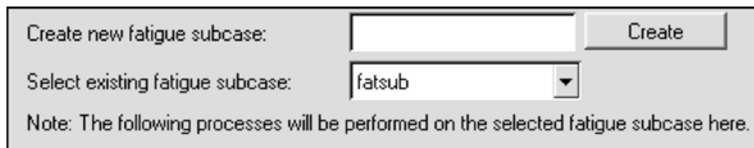


图 8-9　fatsub 工况选择

选择 fatsub 为当前疲劳工况后，接下来的流程（分析参数、疲劳单元、属性和载荷历程等）均将为该工况而定义。

（5）单击 Apply 按钮。

这将保存当前设置并引导用户进入疲劳流程树的下一个环节 Analysis Parameters。

STEP 04 定义疲劳分析参数

（1）确保选中疲劳流程树中的 Analysis Parameters。
（2）选择以下选项：
√ Analysis type：S-N。
√ Stress combination method：Abs. Max. Principal。
√ Mean stress correction：GOODMAN。
√ FEA stress unit：MPA。
√ Rainflow type：LOAD。
（3）输入如图 8-10 所示参数。

√ Gate：0.0。

√ Certainty of survival：0.5。

图 8-10　输入参数

（4）单击 Apply 按钮。

这将保存当前设置并引导用户进入疲劳流程树的下一个环节 Elements and Materials。更多详细信息请参考 HyperWorks 在线帮助。

STEP 05 定义疲劳单元和材料

（1）确保选中疲劳流程树中的 Elements and Materials。

（2）单击 Add 按钮。

弹出 Material Data 对话框，如图 8-11 所示。

图 8-11　Material Data 对话框

（3）在 Element entity type 处选择 Property-PSHELL。

（4）在 Element entity name 处选择 shells。

（5）选择 Ultimate tensile strength（UTS）方法来定义材料数据。

（6）在 Ultimate tensile Strength（UTS）处输入 1800。

（7）将 Define SN Curve 下方的 Input method 选项设置成 Estimate From UTS。

（8）单击 Show SN curve definition 按钮。

弹出 SN Method description 对话框，介绍 SN 材料参数的生成。

（9）单击 Close 按钮。

（10）在 Material type 处选择 Ferrous 并单击 Estimate 按钮。

自动生成 SN 曲线的相关数据。

（11）单击窗口底部的 Plot SN Curve 按钮以显示 SN 曲线。

（12）关闭 SN Curve plot 窗口。

（13）在 Layer of stress results in shell elements 处选择 TOP and BOTTOM。

（14）在 Surface finish 处选择 No Finish。

（15）在 Surface treatment 处选择 No Treatment。

（16）Fatigue strength reduction factor 处保持空白。

（17）单击 Save 按钮保存为所选单元定义的 SN 数据。

（18）单击 Apply 按钮，如图 8-12 所示。

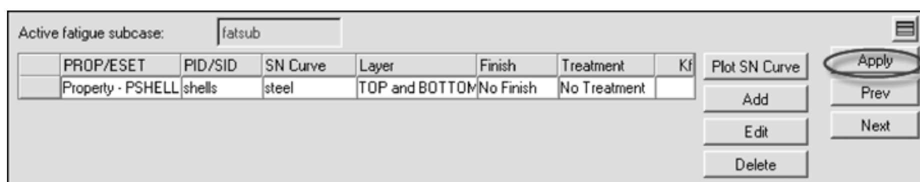


图 8-12　数据保存

这将保存当前设置并引导用户进入疲劳流程树的下一环节 Load-Time History，如图 8-13 所示。

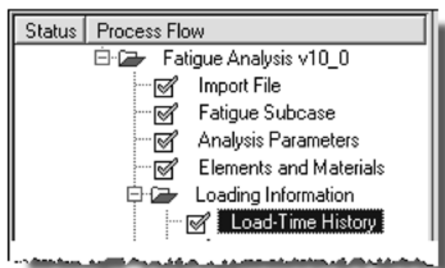


图 8-13　Load-Time History

STEP 06 定义载荷时程曲线

（1）确保选中疲劳流程树中的 Load-Time History。

（2）单击 Add by File。

（3）弹出 Load Time History 对话框，如图 8-14 所示。



图 8-14　Load Time History 对话框

（4）在 Load-time history name 处输入 hist_y。

（5）在 Load-time history type 处选择 CSV。

（6）单击 Open load-time file 按钮。

弹出 Open file 弹出框。

（7）选择文件 tarm_loadY.csv。

（8）单击 Open 按钮。

（9）单击 Import 按钮。

（10）单击 Save 按钮将载荷历程写入 HyperMesh 中。

（11）单击 Plot L-T 按钮显示载荷时间历程曲线。

（12）关闭 Load Time History 窗口。

（13）重复第（2）～（11）步创建另一个载荷时间历程 hist_x。导入的文件为 tarm_loadX.csv。

（14）单击 Apply 按钮。

这将保存当前设置并引导用户进入疲劳流程树的下一个环节 Loading Sequence。

STEP 07 定义加载顺序 Loading Sequence Definition

在这一步中，将创建一个包含两个载荷历程的事件。也就是说，要求在整个分析中两个载荷历程作用下的应力是线性的。使用这一事件，建立一个加载顺序。

（1）确保选中疲劳流程树中的 Loading Sequence。

（2）单击 Add 按钮。弹出 Loading Definition 对话框，如图 8-15 所示。

（3）在 Select static loadcase 处选择 loadx。

（4）在 Select load-time history 处选择 hist_x。

（5）在 Scale 处输入 1.0。

（6）选择 Create new 单选按钮。

（7）为疲劳事件输入事件名 Event1。

（8）单击 Save 按钮。

（9）单击 Add 按钮。

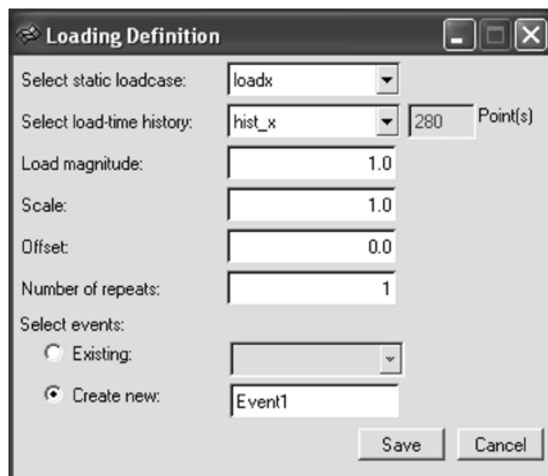


图 8-15　Loading Definition 对话框

弹出 Loading Definition 对话框。

（10）在 Select static loadcase 处选择 loady。

（11）在 Select load-time history 处选择 hist_y。

（12）在 Scale 处输入 1.0。

（13）选择 Existing 单选按钮。

（14）从 Existing 下拉列表框中选择 Event1。

（15）单击 Save 按钮。

（16）单击 Apply 按钮，如图 8-16 所示。

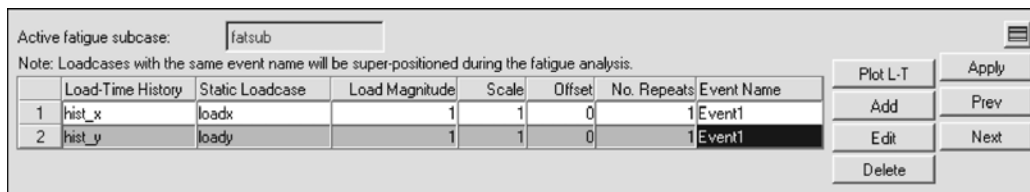


图 8-16　数据保存

这样就完成了疲劳问题的定义。接下来将定义优化问题。

STEP 08　创建自由形状设计变量 (DSHAPE Cards)

（1）单击工具栏中的 HyperMesh 图标，如图 8-17 所示。

（2）进入 Analysis 页面，单击 optimization。

（3）单击 free shape。

（4）选择 create 子面板，单击 desvar=并输入 upper。

（5）单击 nodes 并选择 by sets，勾选 node set upper 复选框。

（6）单击 select。



图 8-17　单击按钮

（7）单击 create。

（8）进入 parameters 子面板，如图 8-18 所示。

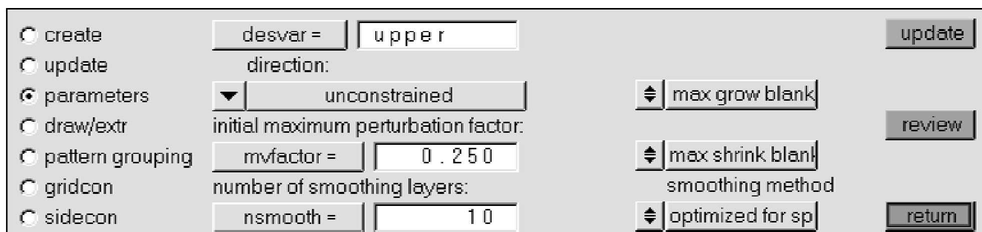


图 8-18　parameters 子面板

（9）设置 mvfactor = 0.25。

（10）单击 update 按钮。

（11）重复第（4）～（10）步操作，为节点集 node set lower 创建设计变量，取名为 lower。

（12）单击 return 按钮退出面板。

STEP 09 定义优化响应

（1）单击 responses 面板。

（2）在 response=处输入 volume。

（3）将 response type 设为 volume，如图 8-19 所示。

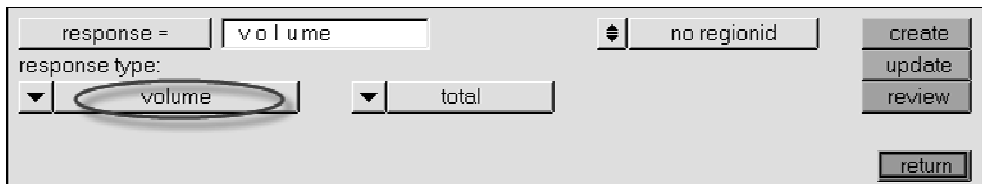


图 8-19　体积响应创建面板

（4）单击 create 按钮。

（5）单击 response=并输入 life。

（6）将 response type 设为 fatigue，如图 8-20 所示。

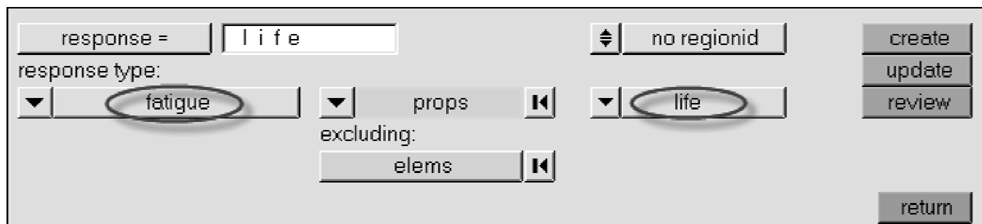


图 8-20　疲劳响应创建面板

（7）单击 props 并选择属性 shells。

（8）单击 create 按钮。

（9）单击 return 按钮返回 optimization 面板。

STEP 10 定义优化约束

（1）进入 dconstraints 面板。

（2）单击 constraint= 并输入 con_life。

（3）单击 response= 并选择 life。

（4）勾选 lower bound= 并输入 2.0e4。

（5）单击 loadsteps，选择 fatsub，并单击 select，如图 8-21 所示。

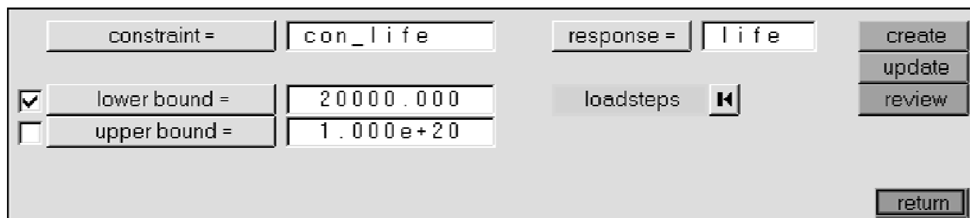


图 8-21　约束创建面板

（6）单击 create 按钮。

（7）单击 return 按钮。

STEP 11 定义目标函数

（1）进入 objective 面板。

（2）将最左边的切换键切换到 min。

（3）单击 response=并输入 volume。

（4）单击 create 按钮。

（5）两次单击 return 按钮返回主面板。

STEP 12 定义 SHAPE 卡片

默认设置下_s#.h3d 文件中只有寿命和损伤的结果。为了在 HyperView 中查看形状改变后的疲劳寿命，需要定义一个 SHAPE 卡片。

（1）进入 Analysis 页面，选择 control cards 面板。

（2）3 次单击绿色的 next 按钮并选择 SHAPE。

（3）将 FORMAT 设为 H3D，TYPE 和 OPTION 设为 ALL，如图 8-22 所示。

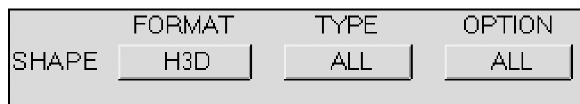


图 8-22　控制参数

（4）两次单击 return 按钮返回主菜单。

STEP 13 提交疲劳优化作业



图 8−23　单击按钮

（1）单击工具栏中最后一个按钮进入 FPM，如图 8−23 所示。

（2）确保选中疲劳流程树中的 Submit Analysis（单击它使其成为激活状态）。

（3）单击 Save .fem file as 按钮。

弹出 Save file 对话框。

（4）设置一个文件保存的路径，在 File name 处输入 tarm_fatigue_opti.fem。

（5）单击 Save 按钮关闭对话框。

（6）单击 Save 按钮保存 OptiStruct 模型文件。

（7）在 Run options 处选择 optimization。

（8）单击 Submit 按钮，如图 8−24 所示。

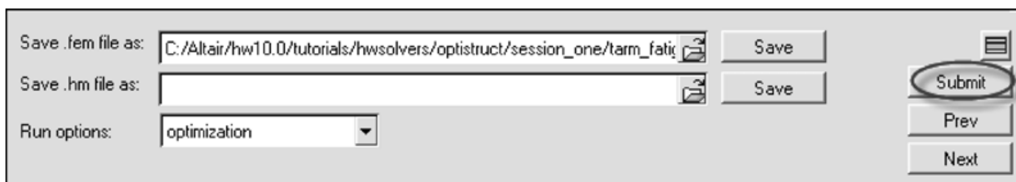


图 8−24　递交计算

这将向 OptiStruct 提交疲劳优化。

如果作业成功进行，将会在 OptiStruct 模型文件的保存路径上产生新的结果文件。

默认情况下将向用户指定的路径写入以下文件，如表 8−1 所示。

表 8−1　结果文件列表

tarm_fatigue_opti.0.4.fat	一个 ASCII 格式的文件，包含每个疲劳迭代步的疲劳结果
tarm_fatigue_opti_s4.h3d	H3D 二进制结果文件，包含静力分析的结果和自由形状疲劳优化的结果
tarm_fatigue_opti.out	OptiStruct 输出文件，包含文件设置的具体信息、疲劳问题的设置、计算时间等信息。查看这个文件可以知道一些警告和错误提示
tarm_fatigue_opti.stat	分析过程总结，提供分析/优化过程中每步的 CPU 信息

STEP 14 后处理

（1）确保选择疲劳流程树中的 Post Processing。

当疲劳优化成功完成时，将自动选择这个环节。

（2）单击 Load H3D Results（HV）按钮，如图 8−25 所示。

这将打开 HyperView 并加载形状优化的疲劳寿命结果文件 tarm_fatigue_opti_s4.h3d。

（3）从 Load Case and Simulation Selection 对话框中选择最后一个迭代步，如图 8-26 所示。

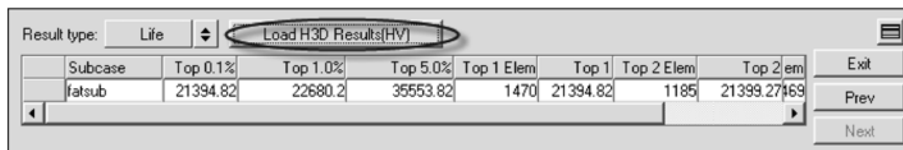


图 8-25　Load H3D Results (HV)

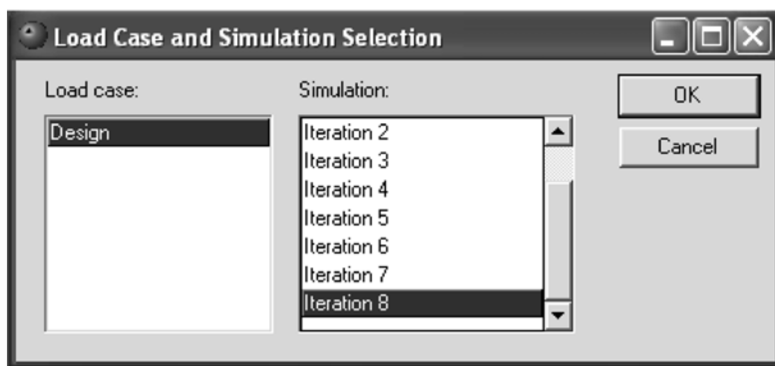


图 8-26　Load Case and Simulation Selection 对话框

（4）单击 Linear Static 动画模式以停止动画。
（5）将动画模式从 Linear Static 切换到 Transient。
（6）这将显示形状改变后的疲劳寿命云图。
（7）单击 Contour 按钮。
（8）单击 Edit Legend 编辑图例使其如图 8-27 和图 8-28 所示（可选）。
（9）单击 Exit 按钮退出疲劳流程树。

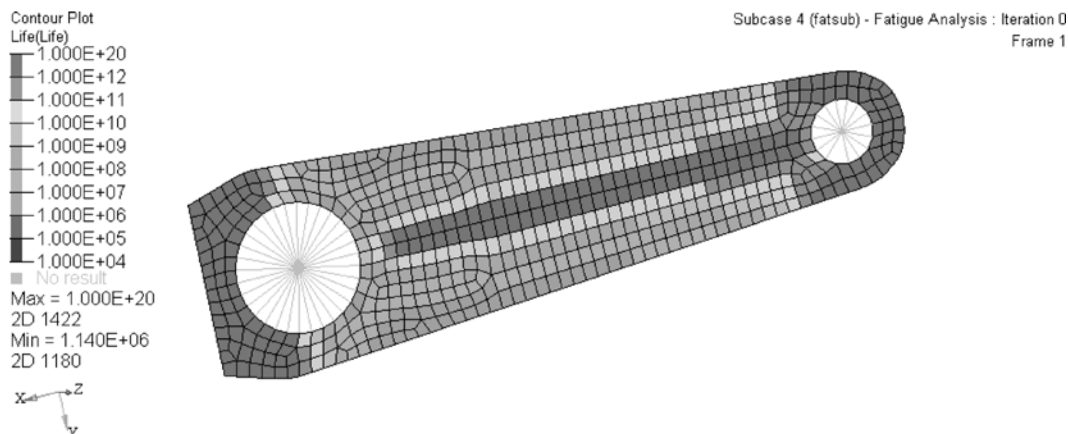


图 8-27　第 0 个迭代步的结果云图

第 0 个迭代步的疲劳寿命云图，体积 = 4.674e+02，最小寿命 = 5.79e+05。

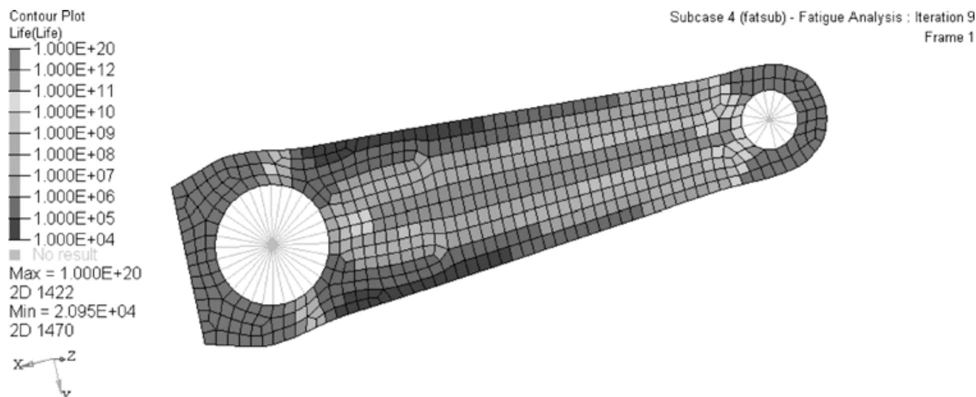


图 8-28　第 8 个迭代步的结果云图

第 8 个迭代步的疲劳寿命云图，体积 = 3.937e+02，最小寿命 = 2.134e+04。

8.3　实例：保险杠的碰撞性能优化

STEP 01　导入模型

（1）启动 HyperMesh 并在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（2）在下拉菜单中单击 file 中的 open，打开 bumper_size_shape_start.hm 文件。

STEP 02　定义单位系统

（1）从 Analysis 页面选择 control cards。

（2）选择 DTI_UNITS，设置参数如图 8-29 所示，然后单击 return 按钮回到主面板。

			MASS	FORCE	LENGTH	TIME
DTI	UNITS	1	MGG	N	MM	S

图 8-29　设置单位制

STEP 03　更新材料

（1）单击 Material 按钮切换到 update 子面板。

（2）单击 mats 选择材料 steel，单击 update/edit。

（3）勾选 MATX 复选框，从下拉列表中选择 MATX02，为几何非线性分析中的 Johnson-Cooke 弹塑性材料定义另外的材料属性。A、B、N 分别为 Johnson-Cooke 材料本构中的 3 个常数，A 表示材料屈服应力；B 表示材料的塑性硬化模量；N 表示材料的塑性硬化指数。

输入图 8-30 中的数据，单击 return 按钮两次回到主面板。



图 8-30 更新材料 steel

（4）单击 mats 选择材料 aluminum，单击 update/edit。

（5）单击 MATX 复选框，选择 MATX02 为几何非线性分析中 Johnson-Cooke 弹塑性材料定义另外的材料属性。

（6）输入图 8-31 中的数据，单击 return 按钮两次回到主面板。



图 8-31 更新材料 aluminum

STEP 04 创建接触

（1）创建两个节点集 nodes_front 和 nodes_mntbrkt。面板如图 8-32 和图 8-33 所示。

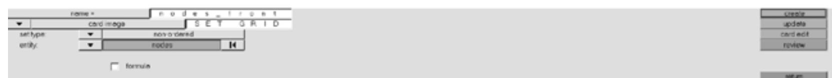


图 8-32 面板信息 1



图 8-33 面板信息 2

nodes_front 节点集中的节点为 section 2.5mm bumper comp 中的所有节点，如图 8-34。

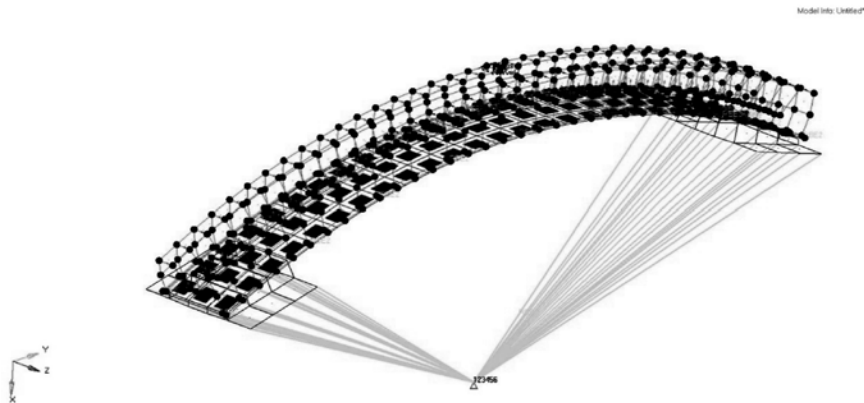


图 8-34 nodes_front 节点集

nodes_mntbrkt 节点集中的节点为 section 2mm mnt comp 中的所有节点，如图 8-35 所示。

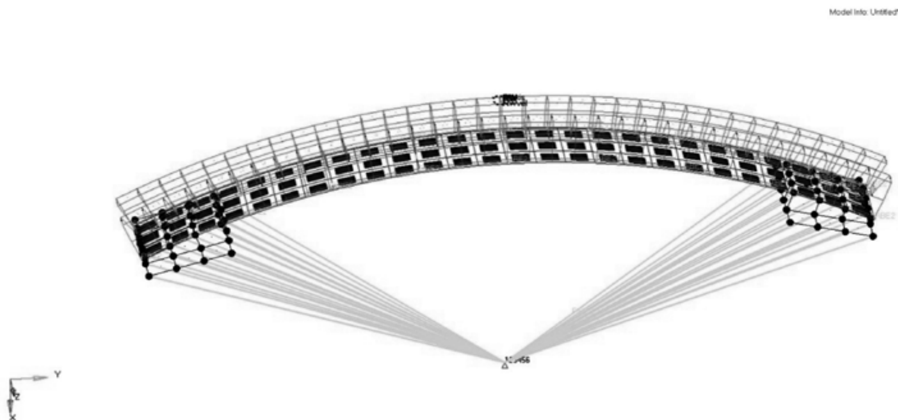


图 8-35　nodes_mntbrkt 节点集

（2）创建第一个 contact surface。从 Analysis 页面选择 contact surfs，进入 elems 子面板，设置如图 8-36（name 为 plate_pushfront）所示。



图 8-36　创建 plate_pushfront 接触面

elems 选择 by clooector 然后选择 section 2mm plate。由于接触方向和法向相反，需要选择 reverse normals 选项。

（3）创建第二个 contact surface。从 Analysis 页面选择 contact surfs，进入 elems 子面板，设置如图 8-37 所示（name 为 plate_pushbrkt）。



图 8-37　创建 plate_pushbrkt 接触面

elems 选择 by clooector 然后选择 section 2mm plate。由于接触方向和法向相同，不需要选择 reverse normals 选项。

（4）创建第一个接触属性，设置如图 8-38 和图 8-39 所示。

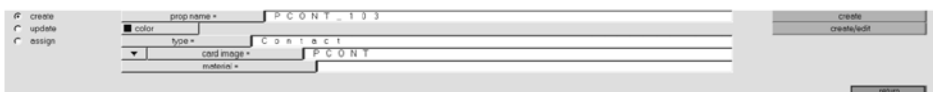


图 8-38　创建接触面板

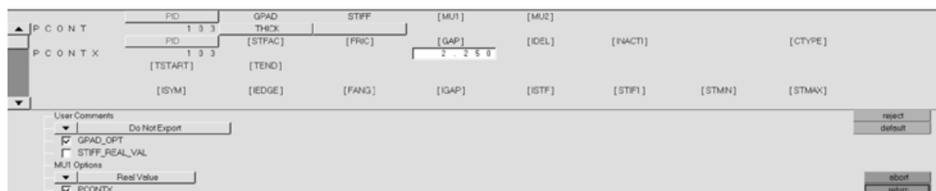


图 8-39　创建第一个接触属性

（5）创建第二个接触属性，设置如图 8-40 所示。



图 8-40　创建第二个接触属性

（6）创建第一个接触对。从 Analysis 页面选择 interfaces，进入 create 子面板，设置如图 8-41 所示。



图 8-41　进 create 子面板

进入 add 子面板，设置如图 8-42 所示。



图 8-42　进入 add 子面板

contactsurfs 选择 plate_pushfront，单击 update 按钮，sets 选择 nodes_front，单击 update 按钮。

进入 card image 子面板，将下方的 Property Option 设置为 Property ID，如图 8-43 所示。

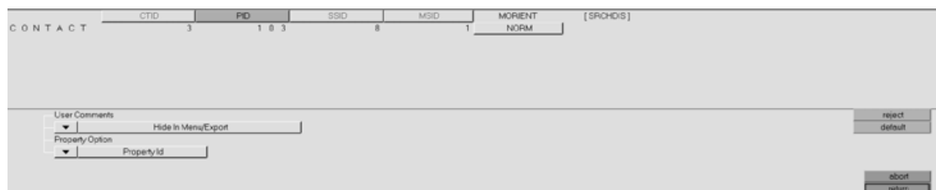


图 8-43　进入 interfaces/card image 子面板

（7）创建第二个接触对。从 Analysis 页面选择 interfaces，进入 create 子面板，设置如图 8-44 所示。



图 8-44　进入 create 子面板

进入 add 子面板，设置如图 8-45 所示。

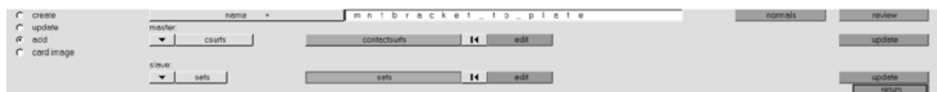


图 8-45　进入 add 子面板

contactsurfs 选择 plate_pushmnt，单击 update 按钮；sets 选择 nodes_mntbrkt，单击 update 按钮。

进入 card image 子面板，将下方的 Property Option 设置为 Property ID，设置如图 8-46 所示（PID 的具体数值可能会有所不同）。



图 8-46　进入 card image 子面板

STEP 05 定义刚性墙

（1）定义两个临时节点。使用快捷键〈F8〉创建节点（100，0，565）并使用 tool/renumber 将其重新编号为 100000。使用快捷键〈F8〉创建节点（101，0，565）并使用 tool/renumber 将其重新编号为 200000。

（2）从 Analysis 页面选择 rigid walls，单击 create 子面板，单击 create 按钮，如图 8-47 所示。



图 8-47　进入 create 子面板

（3）切换到 geom 子面板，base node 选择节点 100000（100，0，565），N1 选择节点 100000（100，0，565）N2 选择节点 200000（101，0，565），单击 update 按钮，如图 8-48 所示。



图 8-48　进入 geom 子面板

（4）切换到 add 子面板，将 dist 设置为 55，单击 update 按钮。

（5）切换到 motion 子面板，设置速度分量如图 8-49 所示（左侧），右侧 type of motion 选择 velocity，然后单击 update 按钮。



图 8-49　进入 motion 子面板

（6）切换到 card 子面板，将 MASS 激活，设置如图 8-50 所示。

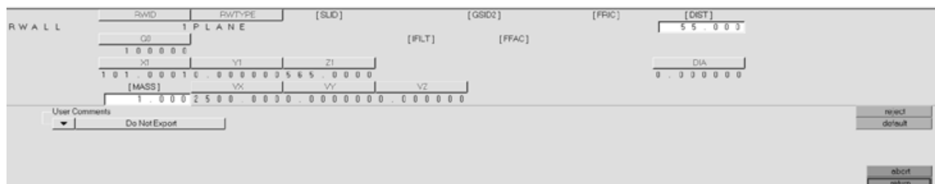


图 8-50　进入 card 子面板

（7）单击 return 按钮退出。

STEP 06 创建固定边界条件

（1）单击 Load Collectors 按钮。

（2）切换到 create 子面板，创建载荷集名字 fix 并将卡片项设置为 no card image，单击 create > return 按钮。

（3）从 Analysis 页面选择 constraints，切换到 create 子面板。

（4）选择 dof1~dof6，load types 选择 SPC。

（5）选择如图 8-51 所示的点（刚性单元的独立节点），然后单击 create 按钮。

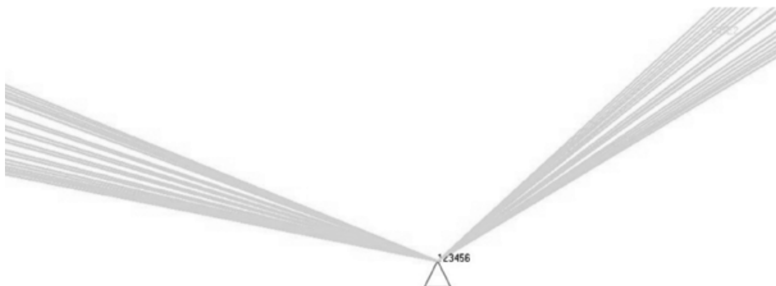


图 8-51　创建约束

STEP 07 创建 XSTEP 载荷集，定义显式分析控制参数

（1）单击 Load Collectors 按钮，输入如图 8-52 所示的数据。



图 8-52　创建 XSTEP Load Collector

（2）单击 create/edit，输入图 8-53 中的数据。

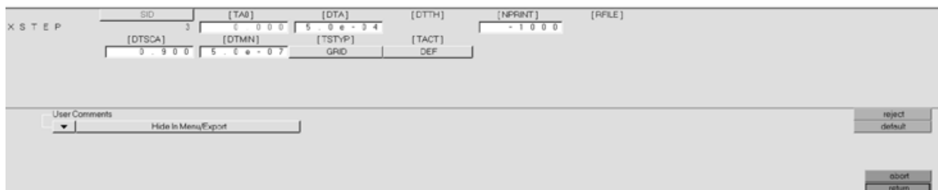


图 8-53　设置 XSTEP 参数

其中 TA0 为动画文件输出开始时间；DTA 为动画文件输出间隔；NPRINT 为迭代信息输出间隔控制，如果为正值表示仅在.out 文件输出，负值表示同时输出到.out 文件和标准输出（UNIX 系统叫法，这里指屏幕输出）；DTSCA 是所有单元的时间步长的缩放系数；DTMIN 为最小时间步长；TSTYP 表示时间步长控制的类型；GRID 表示节点时间步长；TACT 表示时间步长达到临界值后的动作，如果变形后的时间步长小于该值，系统将根据规则使用增加局部质量或者改用小应变选项或者删除单元等方法保证系统的最小时间步长，如果出现删除单元或者质量大幅度增加的情况，则可能影响求解精度。

STEP 08 创建显式分析工况

（1）从 Analysis 页面选择 load steps，设置如图 8-54 所示。



图 8-54　创建分析工况

（2）单击 create 按钮完成创建。

由于目前 TTERM 无法在 HyperMesh 中直接设置，需要在 fem 中进行修改，见本实例的最后。

STEP 09 定义输出控制参数

（1）从 Analysis 页面选择 control cards。

（2）单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST。

（3）选择 CONTF、ENERGY、VELOCITY 和 STRAIN 并使用默认选项，单击两次 return 按钮回到主面板。

STEP 10 创建优化变量

（1）创建 5 个形状变量。进入 optimization/shape，选择 multiple desvars，设置如图 8-55 所示。



图 8-55　创建形状变量

单击 shapes 选择所有 5 个 shape，然后单击 create 按钮创建形状变量。

（2）创建两个尺寸变量。进入 optimization/gauge，设置如图 8-56 所示。

props 选择 section 2mm plate，变量下限为 1.5，变量上限为 3。单击 create 按钮创建第一个尺寸变量。

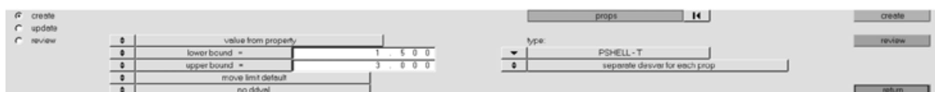


图 8-56　创建第一个尺寸变量

然后再次单击 optimization/gauge，设置如图 8-57 所示。

props 选择 section 2.5mm bumper，变量下限为 2，变量上限为 3.5。单击 create 按钮创建第二个尺寸变量。

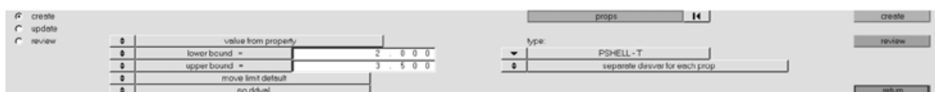


图 8-57　创建第二个尺寸变量

STEP 11 创建两个响应

（1）创建质量响应。进入 optimization/responses，设置如图 8-58 所示。



图 8-58　创建质量响应

单击 create 按钮创建质量响应。

（2）创建位移响应。进入 optimization/responses，设置如图 8-59 所示。



图 8-59　创建位移响应

（3）单击 nodes 选择 by set，然后选择 disp_x，分量选择 dof1。

（4）单击 create 按钮创建位移响应。

STEP 12 创建约束

进入 optimization/dconstraints 面板，设置如图 8-60 所示。

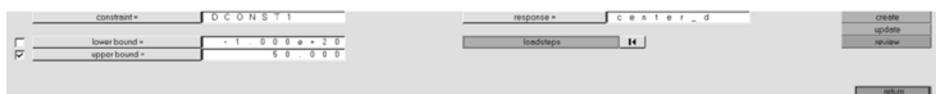


图 8-60　创建位移约束

响应选择 center_d，loadsteps 选择 bumper_impact，约束上限设置为 50，单击 create 按钮创建。

STEP 13 创建目标

进入 optimization/objective 面板，设置如图 8-61 所示。



图 8-61　设置优化目标

响应选择 mass，单击 create 按钮创建。

STEP 14 导出 fem 文件

（1）单击工具栏中的按钮，设置如图 8-62 所示。

（2）注意，HyperMesh 不支持中文路径。将 Export 选项设置为 All，单击 Export 按钮导出模型。

STEP 15 编辑 fem 文件

（1）使用文本编辑器（如写字板等）打开 bumper_size_shape_002.fem 进行编辑。

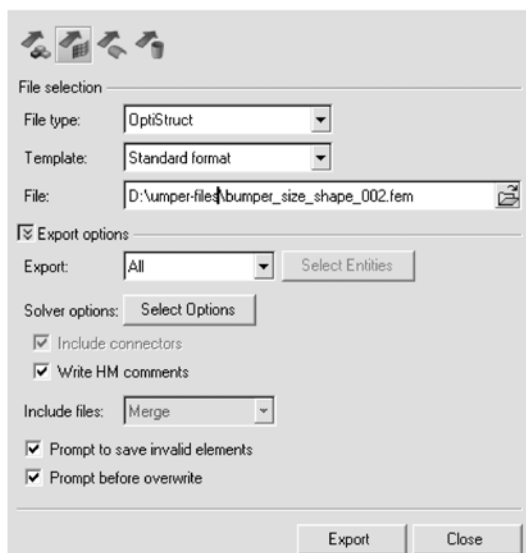


图 8-62　导出 fem 文件

在 subcase 段添加一行 TTERM = 0.08001，编辑后的结果如下（各项的 ID 号根据实际操作可能与本例不同）：

```
SUBCASE             1
LABEL bumper_impact
ANALYSIS EXPDYN
    SPC =               6
    RWALL =             1
    XSTEP =            10
    DESSUB =            2
    TTERM = 0.08001
```

（2）保存文件并退出文本编辑器。

STEP 16 提交求解

从“开始”菜单打开 OptiStruct 并提交求解，如图 8-63 所示。

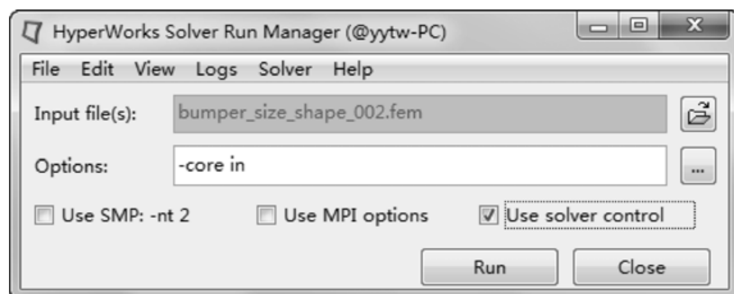


图 8-63　提交求解

STEP 17 查看分析结果

（1）利用 HyperView 打开 bumper_size_shape_002.mvw 文件，结果共有 7 个 page，先进入 page1 查看优化结果。

（2）进入 contour 面板，查看 shape change，如图 8-64 所示。

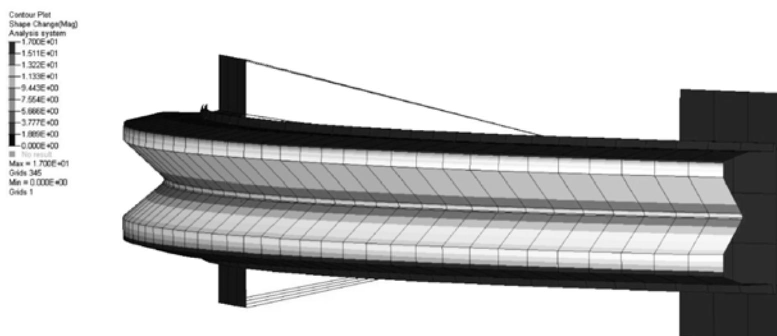


图 8-64　优化后的零件形状

（3）进入 contour 面板，查看 element thickness（s），如图 8-65 所示。

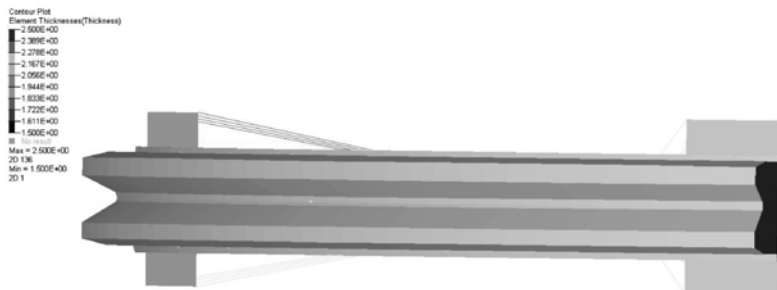


图 8-65　优化后的钣金厚度

（4）单击工具栏上的按钮，切换到其他页面查看不同迭代步的分析结果，如图 8-66 所示。

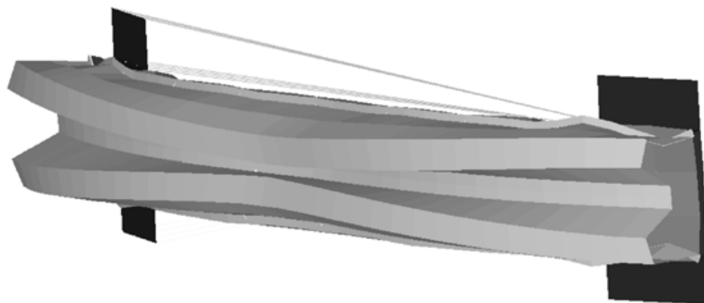


图 8-66　优化后的结构变形

（5）优化前后的质量和位移结果可以在 bumper_size_shape_002.out 中查看。

8.4　小结

OptiStruct 支持对热、疲劳和非线性问题进行直接优化，但仅限于 Radioss/Bulk 支持的分析类型。如果采用其他的求解器，如 Fluent、DesignLife 或者 Abaqus、Dyna 等进行热、疲劳和非线性分析，则可以将这些求解器集成到 HyperStudy 环境，进行更广泛的系统研究和多学科优化。

第 9 章

航空行业优化实例



随着人们对飞机动力性能及经济性要求的提高，工程师必须在满足苛刻的设计要求的前提下，尽可能地减轻重量。此外，为了在设计的最初阶段就能考虑零件的性能，从而使设计具有良好的基因，设计后期不出技术风险，并减少反复设计，工程师必须在概念设计阶段就对产品进行优化设计。传统的参考现有机型或者经验，并进行人工反复设计迭代的过程，已经满足不了新一代飞机结构设计的需要，迫切需要有新的技术来满足重量、性能和设计周期的苛刻要求。

在寻求和试用新技术的过程中，已经在汽车行业广泛应用的结构优化技术得到了各飞机制造商的认可，逐渐在飞机设计中得到应用。特别是 OptiStruct 结构优化技术，更是被应用到了几乎所有新一代飞机的设计中，取得了众多工程成就，获得了多个创新大奖，成为现代飞机结构设计不可缺少的工具。

本章重点知识

9.1 实例：舱门连接铰链拓扑优化
9.2 实例：舱门横梁拓扑优化与尺寸优化
9.3 实例：舱门横梁自由尺寸优化与尺寸优化
9.4 实例：机身整体结构尺寸优化
9.5 小结

9.1 实例：舱门连接铰链拓扑优化

本实例演示了如何在 HyperMesh 中对飞机舱门连接铰链（见图 9-1）进行拓扑优化。

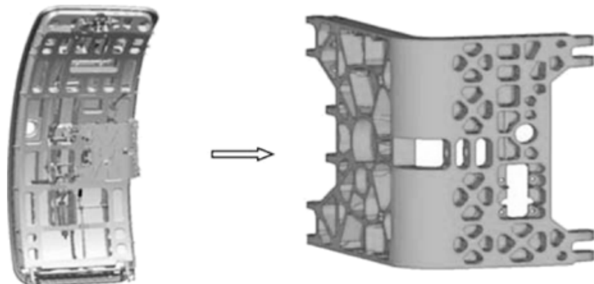


图 9-1　舱门连接铰链

本实例优化问题描述如下。

- √ 设计目标：最小化设计空间体积。
- √ 设计约束：指定位置处的位移约束。
- √ 设计变量：设计空间内的单元密度。

本实例中包含：

- √ 创建拓扑优化变量。
- √ 创建优化响应。
- √ 创建优化约束。
- √ 创建优化目标。
- √ 施加拔模方向控制。
- √ 施加最大、最小尺寸控制。

STEP 01 运行 HyperMesh，设置用户属性，打开模型文件

（1）运行 HyperMesh，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（2）单击 OK 按钮。

（3）在工具栏中单击“导入”按钮，并在模型导入面板中单击“导入有限元模型”按钮。

（4）单击 File: 后面的文件夹图标，打开选择文件对话框。

（5）选择 Altair_door_hinge.fem 文件。

（6）单击 Import ，导入模型文件，如图 9-2 所示。

STEP 02 创建相应的静力分析模型

建立静力分析模型的过程请参考本丛书的相关静力分析的实例，在此省略。

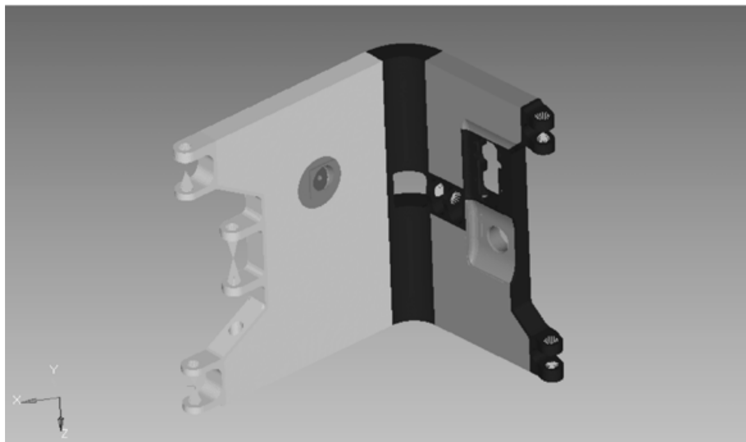


图 9-2　有限元模型

本实例的静力工况在模型中已经创建，可以通过模型树查看相应信息，模型部分信息如图 9-3 所示。

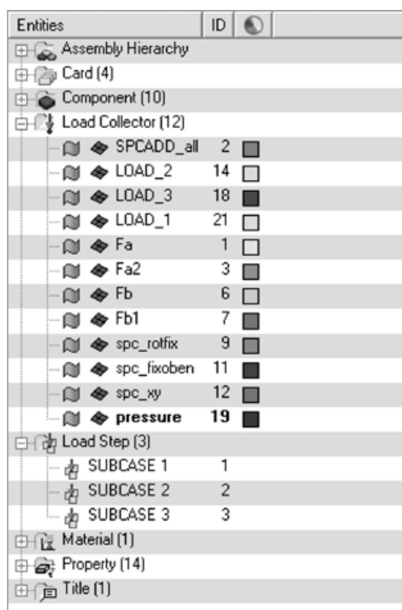


图 9-3　已建好的静力模型的模型树

STEP 03 对模型进行分析

在进行优化计算之前，首先对模型在给定载荷条件下进行静力分析，用于优化后对优化结果进行评估比较。

（1）选择 Analysis 页面，并在该页面内选择 OptiStruct 面板。

（2）单击 save as... 按钮，将静力分析结果保存到响应的文件夹下，并命名为 altair_door_

hinge_static.fem。

（3）其他设置如图 9–4 所示。

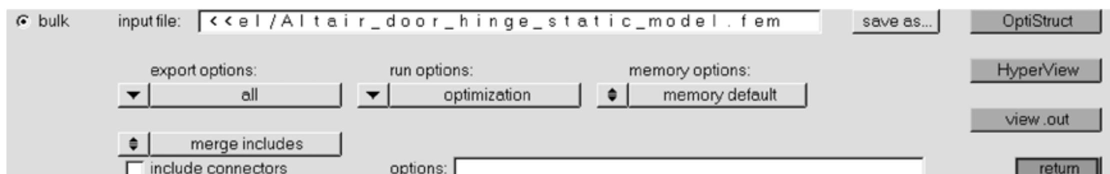


图 9–4 任务递交面板设置

（4）单击 OptiStruct 按钮，进行静力分析求解，出现 DOS 计算窗口。

一段时间后计算结束。使用 HyperView 查看静力分析的结果。

STEP 04 查看静力分析结果

（1）在 OptiStruct 面板中，单击 HyperView，自动导入计算所得结果。

（2）单击 Contour 按钮，进入云图控制面板，并在面板中进行设置如图 9–5 所示。

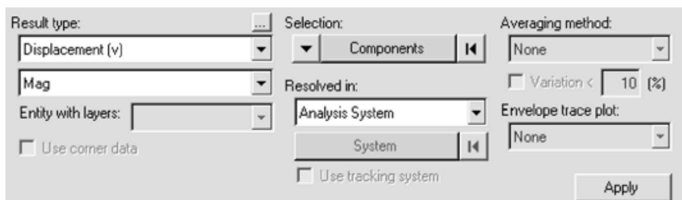


图 9–5 结果查看设置

（3）单击 Apply 按钮，图形窗口中显示静力分析的位移结果云图，如图 9–6 所示。

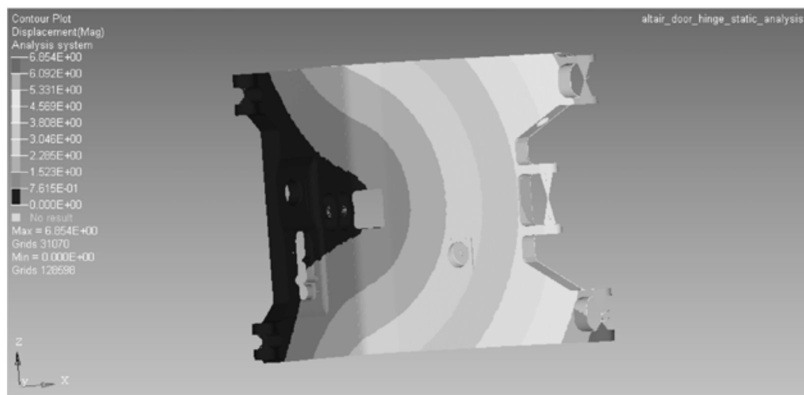


图 9–6 静力分析的位移结果云图

该模型的优化设计空间包含 design1 与 design2 两个设计空间，如图 9–7 所示，它是对原有有限元设计结构通过填充得到的设计空间。关于网格填充以及体单元的画法，请参考本丛书的 HyperMesh 相关内容。

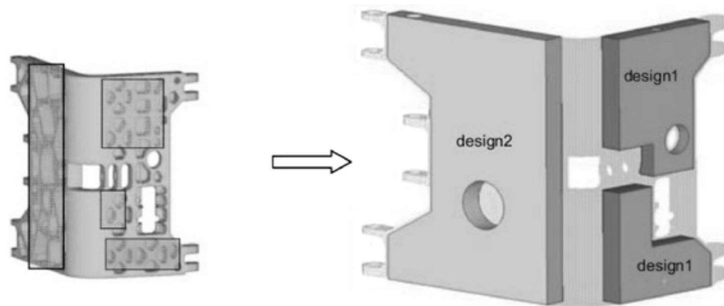


图 9-7　设计空间示意图

下面将演示如何创建针对本实例的优化设置，包括优化变量、响应、约束以及目标。

STEP 05 创建拓扑优化变量

（1）进入面板 Analysis 中的 optimization，单击 topology 按钮，进入拓扑变量创建面板。

（2）在 desvar=中输入 design1，type 选择 PSOLID，如图 9-8 所示。



图 9-8　变量创建

（3）单击右边的 props，选择 design1 设计空间，并单击 select 按钮，如图 9-9 所示。

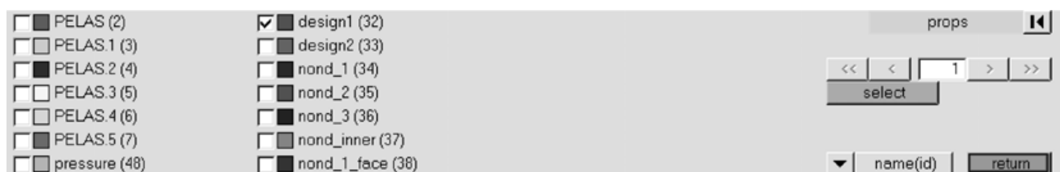


图 9-9　属性选择

（4）单击 create 按钮，创建针对 design1 设计空间属性的优化变量。

（5）重复上面的步骤，创建针对 design2 设计空间属性的优化变量 design2；在模型树中显示创建的两个优化变量，如图 9-10 所示。

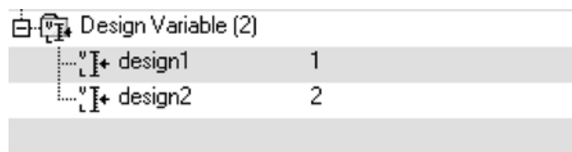


图 9-10　创建的优化变量

STEP 06 创建优化响应

在此将创建以下响应。

√ 体积响应：volume。

√ 位移响应：static displacement。

位移响应以及对应节点与自由度如表 9-1 所示。

表 9-1　位移响应表

位 移 响 应	节 点 号	dof
disp 1	128/261	3
disp 2	128258	2
disp 2_x	128258	1

（1）单击面板 optimization 中的 responses。

（2）在 responses=中输入响应名称 vol，在 response type 下面选择响应类型 volume，如图 9-11 所示。



图 9-11　体积响应创建

（3）单击 create 按钮，创建体积响应。

（4）在 response=中输入位移响应的名称 disp1，在 response type 下面选择响应类型 static displacement，单击 node 中的 by id，输入 128216，按〈Enter〉键，左下角提示 1 entity was selected.，表明节点已经选中，右侧自由度选择 dof3，如图 9-12 所示。

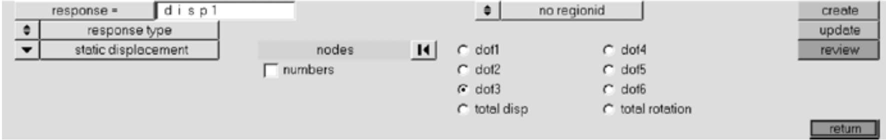


图 9-12　位移响应创建

（5）单击 create 按钮，创建位移响应。

（6）重复 STEP 03，按照位移响应表（表 9-1）中的描述，分别创建位移约束 disp2 和 disp2_x。

模型树中显示如图 9-13 所示。

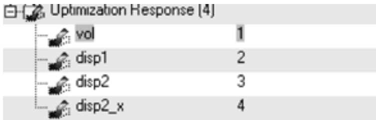


图 9-13　优化响应

STEP 07 创建不同工况下的约束

（1）优化约束就是优化问题中的限制条件，最终的优化目标将会满足优化问题中所设置的所有约束。本实例中需要创建的约束以及每个约束对应的响应、工况以及上下限如表 9−2 所示。

表 9−2　位移约束值

设 计 约 束	设 计 响 应	工　况	上　限　值	下　限　值
dis1	disp1	subcase1		−8.33
dis2	disp2	subcase2		−2.07
dis3	disp2	subcase3	1.08	
dis2_x	disp2_x	subcase2		−2.85
dis3_x	disp2_x	subcase3	0.36	

（2）进入面板 Analysis 中的 dconstrains，在 constrain =中输入 dis1。

（3）单击 response 按钮，选择响应 disp1，单击 select。

（4）勾选 lower bound 复选框，并在后面填入下限约束值−8.33，如图 9−14 所示。



图 9−14　约束创建

（5）单击 create 按钮，创建约束 dis1。

（6）从上面的步骤可以发现，约束 dis1 是响应 disp1 在工况 subcase1 条件下位移的上限约束。优化问题求解过程中，在工况 subcase1 中响应 disp1 中节点的位移不会超出在约束中所设置的下限。

重复上面的步骤，参照表 9−2 创建其他的约束。

最终模型树中约束显示如图 9−15 所示。

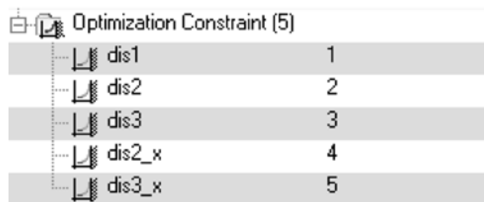


图 9−15　优化约束创建完成

STEP 08 创建优化目标

优化目标即满足给定约束条件下的结果。本实例的目标是体积最小，可以理解为满足约

束条件下材料使用最少的结果。

（1）进入面板 Analysis 中的 objective。

（2）在目标类型中选择 min，响应中选择 vol，如图 9–16 所示。



图 9–16　目标创建

（3）单击 create 按钮，创建优化目标。

至此，优化所需的优化三要素均已创建完毕，可以对该问题使用 OptiStruct 进行求解。

STEP 09 优化计算

（1）进入面板 OptiStruct，单击 save as 按钮，将文件另存到相应的文件夹下，并命名为 door_hinge_opti_1.fem，如图 9–17 所示。



图 9–17　任务递交面板

（2）单击 OptiStruct 按钮求解计算。

一段时间后计算结束。单击 HyperView 按钮，查看优化结果。

STEP 10 查看优化结果

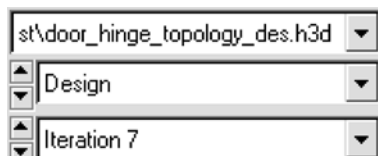


图 9–18　迭代步选择

（1）在 OptiStruct 面板中单击 HyperView，结果文件将自动导入。

（2）在左边结果控制区域的第二栏中选择 Design，第三栏中选择迭代步，如图 9–18 所示：一般情况下，选择最后一步，查看最后一步的最优结果。

（3）选择 Counter 按钮 并单击，进行如图 9–19 所示设置，并单击 Apply 按钮。

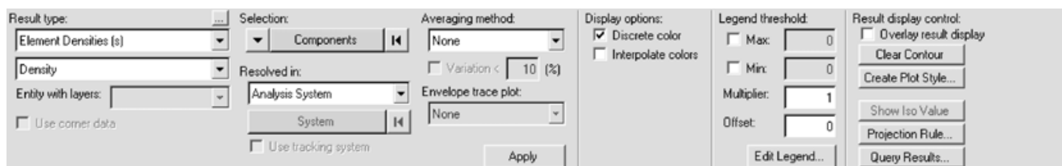


图 9–19　结果显示控制

（4）优化后的单元密度云图显示如图 9-20 所示。

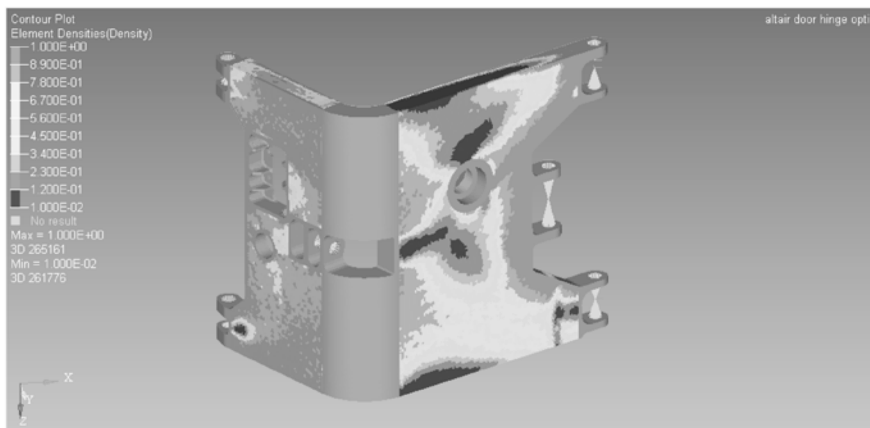


图 9-20 单元密度云图

从左侧标注可以发现，蓝色区域为材料密度较低的地方，红色区域表示材料集中的地方，也就是结构最需要布置材料的区域。

（5）选择 ISO 按钮 并单击进入控制面板，参数设置如图 9-21 所示，并单击 Apply 按钮。

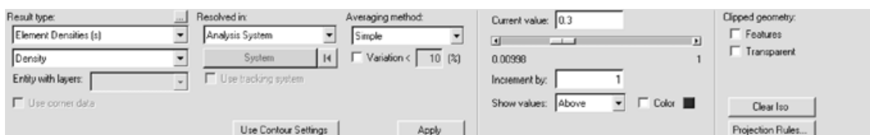


图 9-21 等值图显示控制

密度等值图显示如图 9-22 所示。

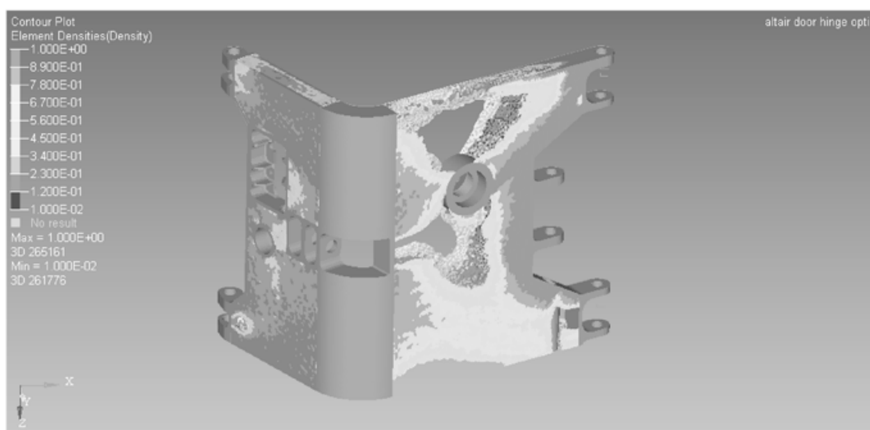


图 9-22 密度等值图

HyperView 将材料密度低于 0.3 的单元全部隐藏掉，这样可以更清楚地看到在给定约束条件下材料内部的传力路径。

STEP 11 添加拔模方向约束

当所设计的零件将采用铸造、注塑、机加工等生产工艺时，需要考虑拔模方向约束，以便加工。拔模方向可以在优化过程中按照给定的方向去除材料，充分考虑只在加工过程中遇到的问题。

OptiStruct 中有 SINGLE 和 SPLIT 两种拔模方向，如图 9-23 所示，可以在不同的情况下选择所需要的拔模类型。

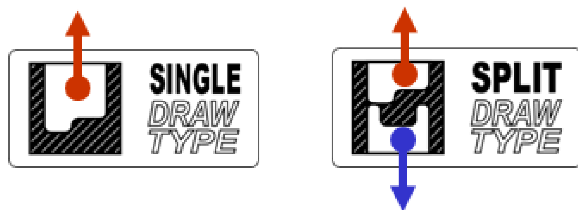


图 9-23　两种拔模方式示意

（1）进入面板 Analysis 中的 optimization。

（2）单击 topology 按钮，进入拓扑优化变量面板。

（3）单击 review 按钮并选择拓扑变量 design1；在 desvar =文本框中显示 design1。

（4）选择 draw 面板，单击 review 按钮，选择优化变量 design1。

（5）选择 draw type 为 single，如图 9-24 所示。

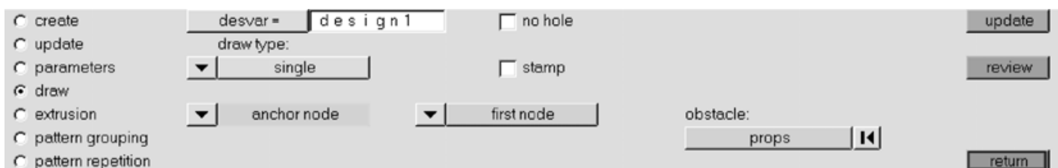


图 9-24　拔模约束添加

（6）单击 anchor node 两次，在 id=文本框中输入 15922；单击 first node 两次，在 id=中输入 128604。

这样就定义了从 anchor node 指向 first node 的拔模方向。

（7）单击 obstacle 按钮两次，在属性面板中选择所有非设计空间，如图 9-25 所示。

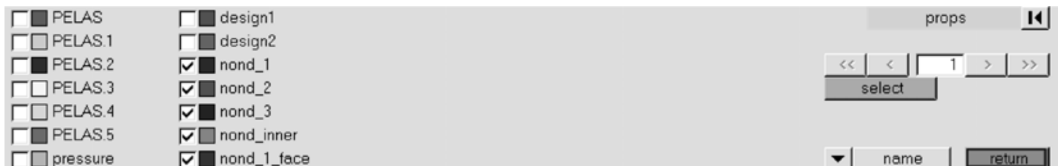


图 9-25　属性选择

（8）单击 select 按钮。

（9）单击 update 按钮，更新设计变量。

（10）重复上面的步骤（3）～（8），对设计变量 design2 施加拔模方向约束，其中 anchor node 与 first node 分别是 2334 与 128605。

STEP 12 优化计算

（1）进入面板 OptiStruct，单击 save as 按钮，将文件另存到响应的文件夹下，并命名为 door_hinge_opti_2.fem，其他设置如图 9-26 所示。



图 9-26 任务递交面板

（2）单击 OptiStruct 按钮求解计算。

（3）一段时间后计算结束。直接单击 HyperView 按钮，查看优化结果。

STEP 13 查看优化结果

（1）按照上述 STEP 10 的操作，打开 HyperView，并选择 Design 结果与最后迭代步，如图 9-27 所示。

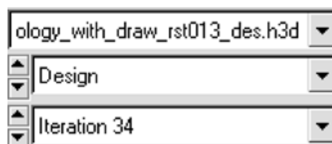


图 9-27 结果迭代步选择

（2）选择云图显示单元密度，查看材料分布，如图 9-28 所示。

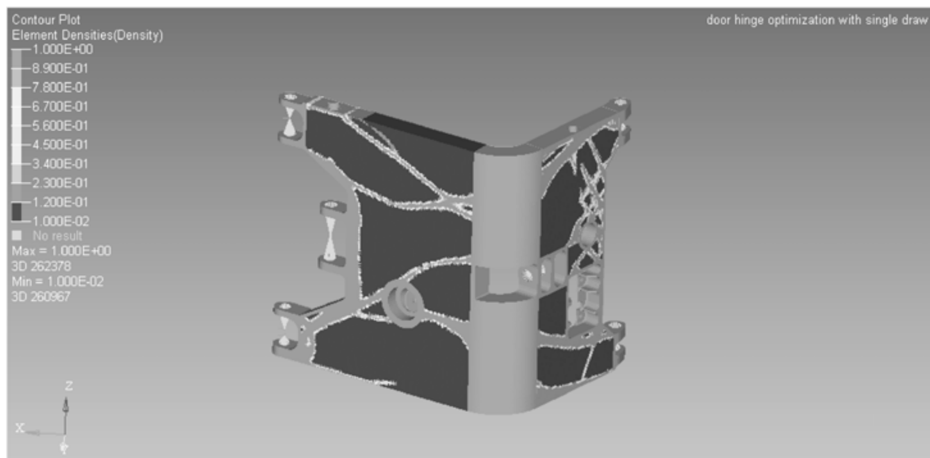


图 9-28 优化结果

可以看到材料分布脉络更加清晰。

（3）选择密度等值图查看模式，设置如图 9-29 所示。

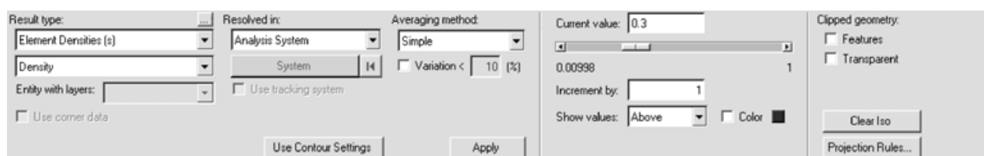


图 9-29　结果控制面板

（4）单击 Apply 按钮，看到单元密度在 0.3 以上的优化结果，如图 9-30 所示。

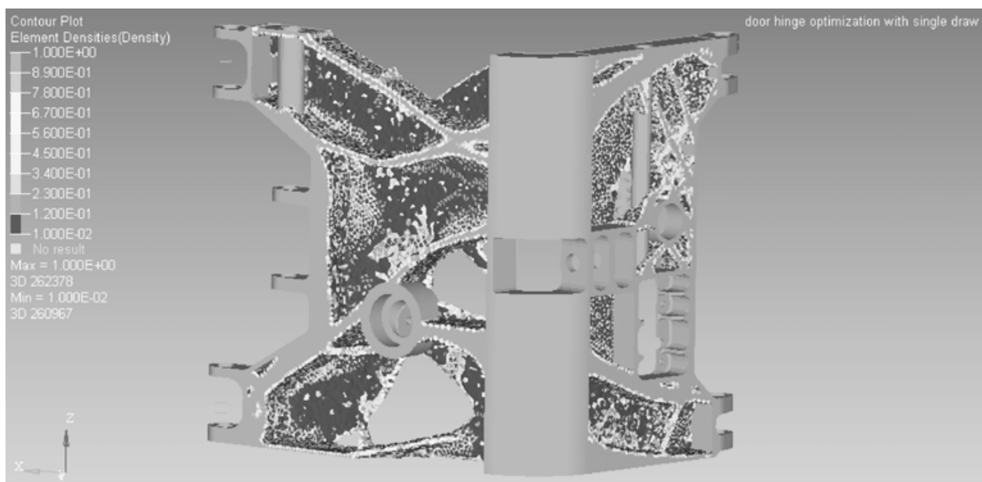


图 9-30　优化结果

相比没有施加拔模方向约束的结果会更加清晰。但是同时注意到在 design1 设计空间内有许多小尺寸保留区域，对加工制造造成不便，因此将继续添加最大、最小尺寸以及约束控制结构中保留区域的尺寸。

STEP 14 增加最大、最小尺寸约束

最小尺寸约束：删除优化结果中出现的小的特征，以方便加工制造，如图 9-31 所示。最小尺寸不小于设计空间平均单元尺寸的 2 倍。

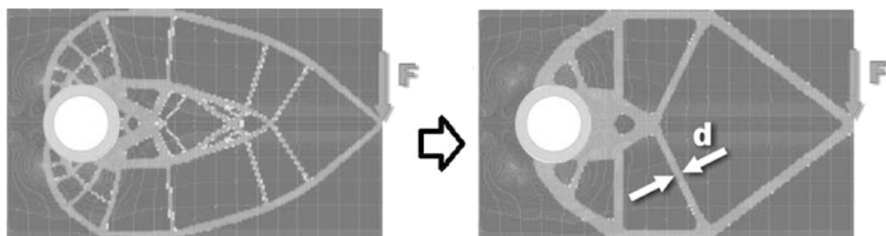


图 9-31　最小尺寸约束效果

最大尺寸约束：控制优化结果中的材料的堆积，如图 9-32 所示。最大尺寸一般不小于最小控制尺寸的 2 倍，不大于设计空间长宽的 1/2。

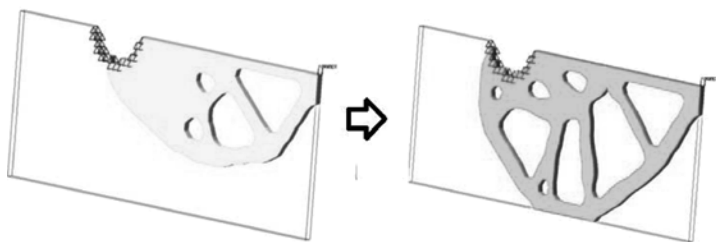


图 9-32　最大尺寸约束效果

（1）进入面板 Analysis 中的 optimization。

（2）单击 topology 按钮，进入拓扑优化变量面板。

（3）单击 review 按钮并选择拓扑变量 design1；在 design = 中显示 design1。

（4）选择 parameters 面板，并单击 mindim=与 maxdim=按钮前面的“转换”按钮，切换到可编辑模式，并在最小尺寸中输入 5，最大尺寸输入 10，如图 9-33 所示，单击 update 按钮。

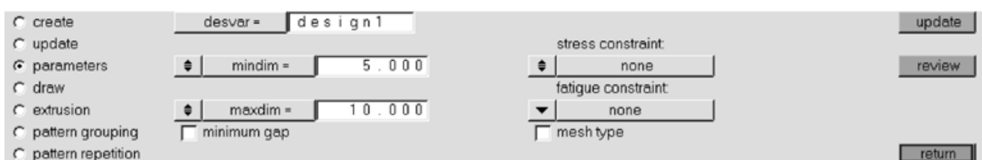


图 9-33　尺寸参数更新

（5）重复上述步骤，对 design2 设计变量添加相同的最大、最小尺寸控制。

STEP 15　递交求解

（1）按照前面所示的递交任务方法，递交计算优化任务。

（2）计算结束后，同前面的方法一样，使用 HyperView 查看计算结果，选择迭代求解的最后一步，查看优化计算结果。

（3）云图控制面板与等值图控制面板设置如图 9-34 和图 9-35 所示。

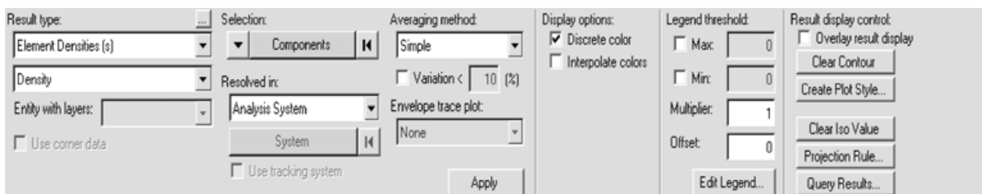


图 9-34　云图控制面板设置

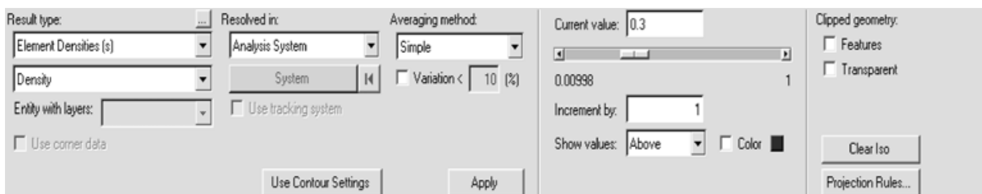


图 9-35　等值图控制面板

（4）经过上述设置后图形窗口显示如图 9-36 所示。

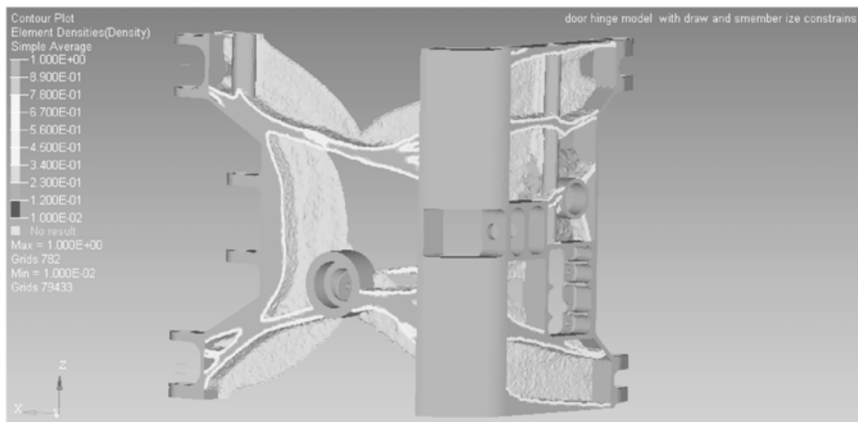


图 9-36　优化结果

其中的小特征已经明显不存在，整体看起来清晰明了。

在优化问题中使用尺寸约束的结果对比如图 9-37 所示。

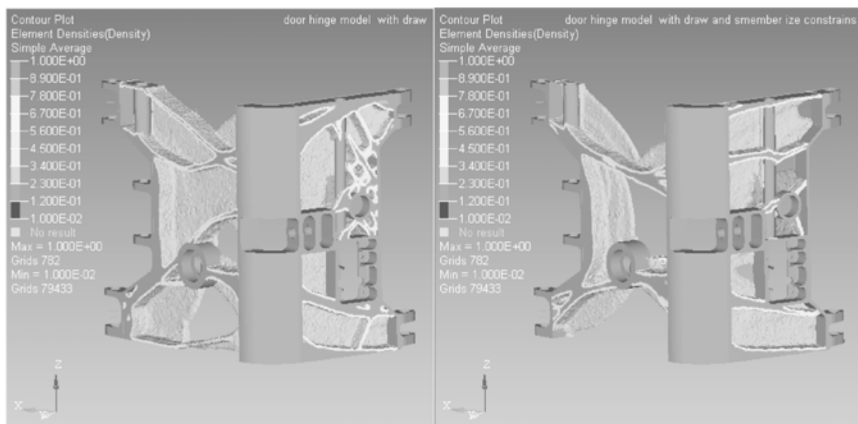


图 9-37　添加尺寸约束前后比较

9.2　实例：舱门横梁拓扑优化与尺寸优化

传统的飞机舱门横梁一般包括腹板，上缘条、下缘条和加强筋等，是一种经典的受力结构方式，类似结构样式也可见于机身框和机翼翼肋等。本实例采用如图 9-38 所示舱门横梁演示如何进行横梁的优化设计。

STEP 01　启动 HyperMesh 并设置 OptiStruct 用户模板

（1）启动 HyperMesh，将弹出 User Profiles 对话框。

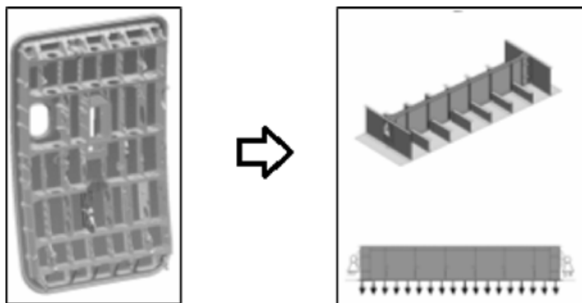


图 9-38　舱门横梁

（2）在 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（3）单击 OK 按钮。

STEP 02 导入模型文件

（1）单击工具栏上的 Import Solver Deck 按钮，选择模型文件 topo_size_1.fem。

（2）单击 Open 按钮。

STEP 03 创建约束及载荷

（1）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮。

（2）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 SPC。

（3）单击 card image 左侧的三角箭头选择 no card image。

（4）单击 create，创建一个名为 SPC 的 load collector。

（5）单击 Analysis 中的 constraints，确保进入 create 子面板。

（6）单击 nodes，选择 by id，在 id=后输入 1。选择 1 号节点。

（7）在右侧勾选 dof2、dof3、dof4、dof5。单击 create 按钮，在 1 号节点创建 2、3、4、5 自由度的约束。

（8）单击 nodes，选择 by id，在 id=后输入 1944。选择 1944 号节点。

（9）在右侧勾选 dof1、dof2、dof3、dof4、dof5。单击 create 按钮，在 1 号节点创建 1、2、3、4、5 自由度的约束。

（10）单击 nodes，选择 on plane，在 tolerance=后输入 0.5，然后依次单击如图 9-39 所示的 3 个节点。

（11）单击 select entities，选择结构一侧端面上的所有节点，如图 9-40 所示。

（12）重复（10）和（11），选择另一侧端面上的所有节点。在右侧勾选 dof3、dof4、dof5。单击 create。在两侧节点上创建 3、4、5 自由度的约束。

（13）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮。

（14）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 pressure。

（15）单击 card image 左侧的三角箭头选择 no card image。

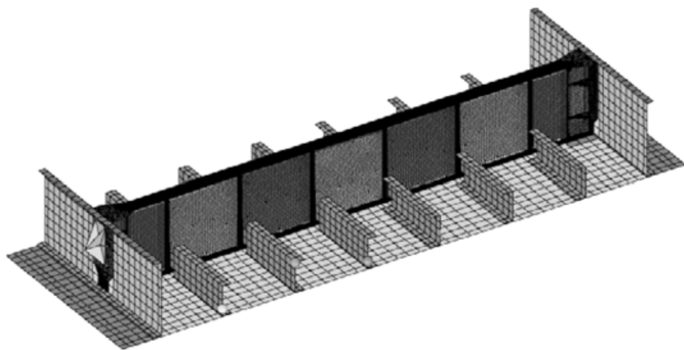


图 9-39　节点选择

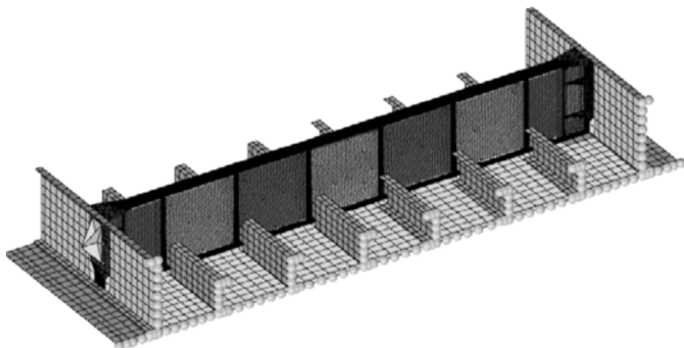


图 9-40　侧面节点选择

（16）单击 create 按钮，创建一个名为 pressure 的 load collector。

（17）单击 Analysis 中的 pressures，确保进入 create 子面板。

（18）单击 elems 选择 on plane，在 tolerance=后输入 0.8，然后单击底板上的 3 个节点。单击 select entities，选择底板上的所有单元。

（19）在 magnitude=后输入 0.062，然后单击 create 按钮。在底板上创建大小为 0.062MPa 的压力，如图 9-41 所示。

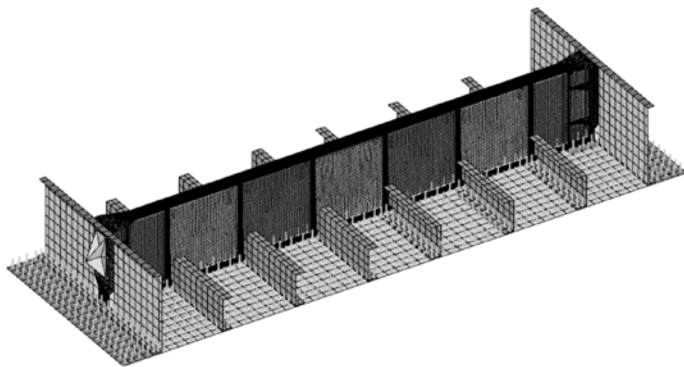


图 9-41　压力加载

（20）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮。

（21）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 1.33P。

（22）单击 card image 左侧的三角箭头选择 card image。单击 card image 选择 LOAD，单击 create/edit 按钮，进入 LOAD 卡片编辑页面。

（23）在 S1(1)下输入 1.33，单击黄色 L1(1)按钮，在弹出的面板中选择已创建的 load collector：pressure。

（24）单击 return 按钮。

这样就创建了一个组合工况 1.33P，即为 1.33 倍的 pressure。

STEP 04 设置静态分析工况

（1）单击 Analysis 中的 load steps，确保在 type 的右侧显示为 linear static，否则单击三角箭头选择 linear static。

（2）在 name=后输入 1.33P，勾选下方的 SPC、LOAD。单击 SPC 后的空白区域，选择 SPC，单击 LOAD 后的空白区域，选择 1.33P。单击 create 按钮。

（3）单击 return 按钮退出。

STEP 05 创建拓扑优化的设计变量

（1）单击模型浏览器上的 show/hide 按钮，然后用右键单击图形窗口中不需要的部件，使其隐藏，仅保留上缘条和腹板，如图 9-42 所示。

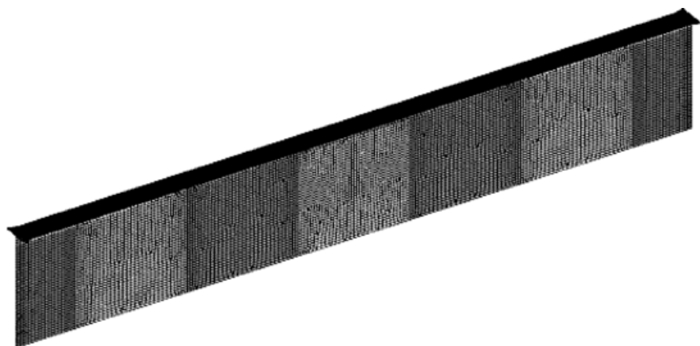


图 9-42 选择保留的部件

（2）单击 Analysis 中的 optimization，单击 topology 按钮，确保进入 create 子面板。

（3）输入变量名 desvar= topo。

（4）单击 type 下方的三角箭头，选择 PSHELL。

（5）单击 props，按〈Shift〉键的同时用左键框选图形窗口中显示的部件，一共 12 个。其 property 名分别为 10104000、10106000、10106100、10136000、10136100、10146000、10146100、10154000、10164000、10184000、10186100。单击 return 按钮。

（6）单击 create 按钮。定义了名为 topo 的拓扑优化设计变量，设计空间为上缘条和腹板所有单元。

（7）单击 return 按钮退出。

STEP 06 创建拓扑优化响应

（1）单击 responses 按钮。

（2）在 response=后输入 M_beam，单击 response type 下方的三角箭头，选择 mass。单击 total 左侧的三角箭头，选择 by entity。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 mats。单击图形窗口中腹板上任意一个单元，单击 create 按钮。这就定义了名为 M_beam 的响应，其数值为整个梁的质量。

（3）单击模型浏览器上的 show/hide 按钮，然后用右键单击图形窗口中不需要的部件使其隐藏，仅保留上缘条和腹板。

（4）在 response=后输入 disp_y，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static displacement。单击黄色 nodes 按钮，选择 by path。依次单击腹板底板两个端点，选中腹板底部的所有节点，如图 9−43 所示。

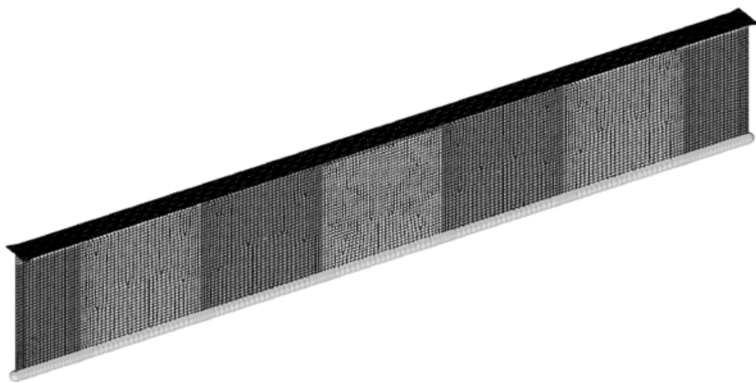


图 9−43　腹板底部节点选择

（5）选择 dof2 前的单选按钮，单击 create 按钮。这就创建了名为 disp_y 的响应，其值为腹板底部所有节点 *y* 方向的位移。

（6）单击 return 按钮退出。

STEP 07 创建优化约束条件及目标函数

（1）单击 dconstraints。

（2）输入 constraint=disp_y，单击 response=后的空白区域，选择 disp_y。

（3）勾选 lower bound 复选框，在后面输入−3，勾选 upper bound 复选框，在后面输入 3，单击黄色 loadsteps 按钮，勾选 1.33P 复选框，单击 select 按钮。

（4）单击 create 按钮。这就定义了对响应 diap_y 的约束，在 1.33P 的工况下其上下限分别为 3 和−3。

（5）单击 return 按钮。

（6）单击 objective，确保左侧显示为 min，否则单击三角箭头选择 min。

（7）单击 response=后面的空白区域，选择 M_beam，单击 create 按钮。这就创建了一个最小化梁的质量(M_beam)的目标函数。

（8）单击两次 return 按钮，退出优化面板。

STEP 08 优化求解

（1）单击 Analysis 中的 OptiStruct，单击 save as 按钮选择模型文件及结果文件存放位置。

（2）单击 OptiStruct，开始求解模型。

（3）求解完成后关闭命令行窗口，返回到 HyperMesh 中。

STEP 09 结果后处理

（1）单击 HyperView，直接打开 HyperView 并自动导入了结果文件。

（2）单击工具栏上的 contour 按钮，选择最后一步迭代。单击 Apply，查看优化迭代过程中的单元密度分布，如图 9-44 所示。

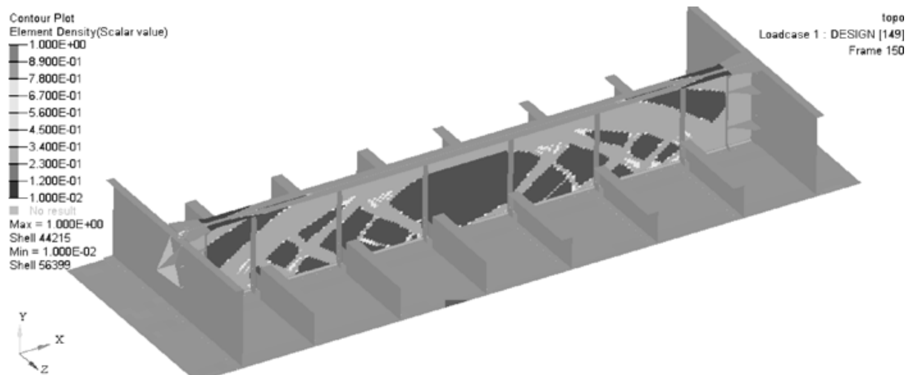


图 9-44　单元密度优化结果

（3）单击工具上上的 Iso 按钮，单击 Apply，查看单元密度等值面分布，如图 9-45 所示。

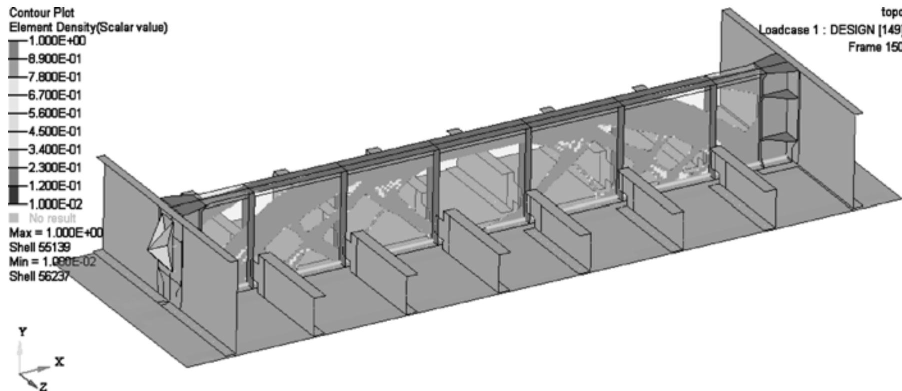


图 9-45　单元密度等值分布

STEP 10 创建尺寸优化模型

（1）返回 HyperMesh 中，单击 post 中的 OSSmooth，进入 FEAtopology 子面板，确保 file 栏中选中的是 topo_size_1.sh 文件。如果不是，请单击后面的“文件夹”按钮，选择结果文件中的 topo_size_1.sh 文件，如图 9−46 所示。

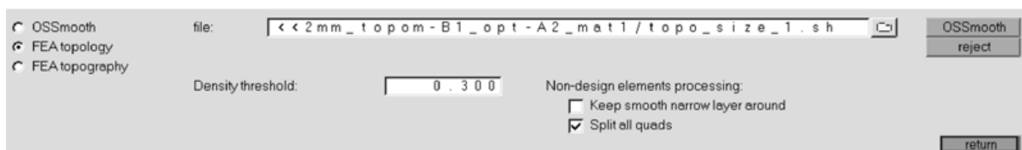


图 9−46　文件选择

（2）在 Density threshold 后输入密度阈值 0.3，单击 OSSmooth。HyperMesh 会调用 OSSmooth 功能对拓扑优化结果按给定的阈值进行网格重新划分，并自动导入划分好的网格。这就是拓扑优化的结果。下一步要进行尺寸优化。

（3）在拓扑优化得到的结果的基础上，对 OSSmooth 自动划分的网格进行 remesh。单击 2D 中的 automesh，单击 surfs 右侧的三角箭头，选择 elems，在图形窗口中选择质量不好的单元。在 elem size=后输入单元尺寸 5，单击 mesh。选中的单元即被重新划分。

（4）重复这一操作，直到网格质量可以接受，如图 9−47 所示。

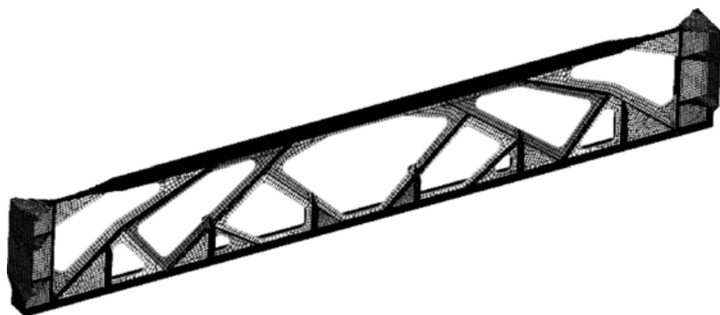


图 9−47　网格调整结果

（5）在腹板内圈创建 BEAM 单元来模拟内缘条。单击 Tools 中的 Edge 找出腹板内圈的自由边，删除腹板内圈外多余的自由边，将 Edge 重命名为 Bars，单击 2D 中的 config edit，选择内圈自由边，在 new config 二处输入 bar2，单击 switch 按钮，将自由边转换为梁单元，如图 9−48 所示。



图 9−48　梁单元转换

（6）单击 Property collector 为内缘条创建属性，如图 9−49 所示。

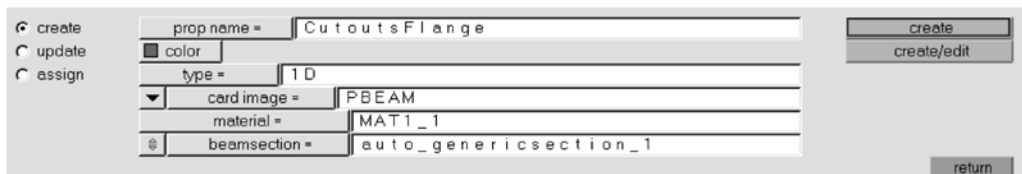


图 9−49　梁属性创建

（7）单击 1D 中的 bars 为内缘条定义局部坐标系，选择所有的内缘条，在 property=处选择 CutoutsFlange，在 elem types=处选择 CBAR，梁单元 *y* 轴方向选择为 *z* 方向，如图 9−50 所示。

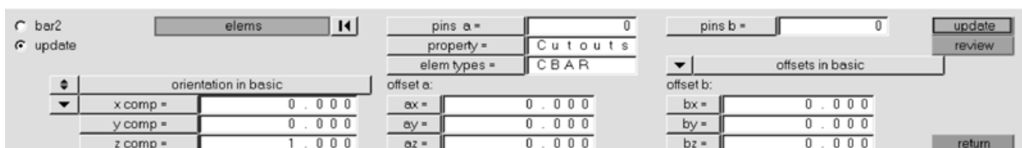


图 9−50　梁单元创建

（8）省略（1）～（5），使用已经划分好的模型。单击菜单栏上的“新建”按钮，在弹出的对话框中单击“是(Y)”按钮。

（9）单击工具栏上的 ImportSolverDeck 按钮，选择模型文件 topo_size_2.fem。

（10）单击 Open 按钮。

STEP 11　创建屈曲工况

（1）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮。

（2）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 buckling。

（3）单击 card image 左侧的三角箭头选择 card image。单击 card image 选择 EIGRL，单击 create/edit 按钮进入 EIGRL 卡片编辑页面。

（4）在[V1] 下方的文本框中输入 0。在[ND]下方的文本框中输入 5，如图 9−51 所示。



图 9−51　模态卡片创建

（5）单击 return 按钮退出。

（6）单击 Analysis 中的 loadsteps，确保在 type 的右侧显示为 linear static，否则单击三角箭头选择 linear static。

（7）在 name=后输入 1.33P，勾选下方的 SPC、LOAD。单击 SPC 后的空白区域，选择 SPC。单击 LOAD 后的空白区域，选择 1.33P。单击 create 按钮，这就创建了一个静态分析工况。

（8）在 name=后输入 buckling，单击 type 右侧的三角箭头，选择 linear buckling。勾选下方的 SPC、STATSUB、METHOD(STRUCT)。单击 SPC 后的空白区域，选择 SPC。单击

STATSUB 后的空白区域，选择已创建的载荷工况 1.33P。单击 METHOD（STRUCT）后的空白区域，选择 buckling。

（9）单击 create 按钮，这就创建了一个线性屈曲分析工况。

STEP 12 创建尺寸优化设计变量

（1）单击 Analysis 中的 optimization，选择 gague，进入 gague 子面板。

（2）单击 props 按钮，在图形窗口中单击梁上缘条、下缘条、腹板和立筋。单击 select 按钮选择 43 个 property，如图 9−52 所示。

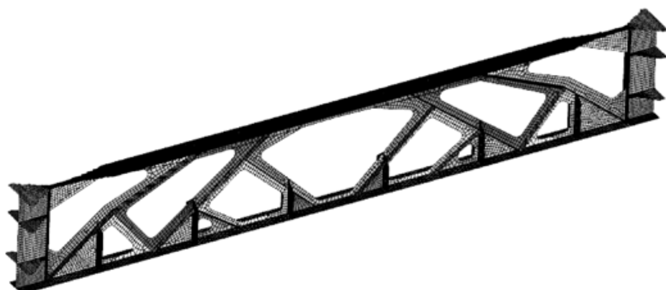


图 9−52　属性选择

（3）在 lower bound =后输入 1.6，在 upper bound=后输入 2.0，其余选项默认，如图 9−53 所示。

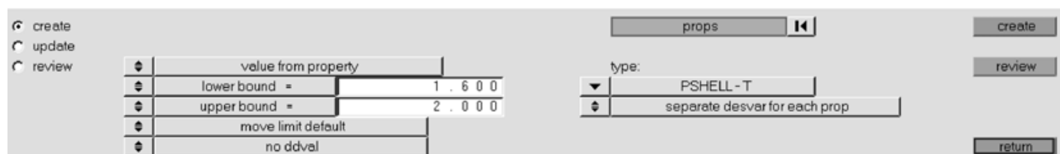


图 9−53　尺寸变量创建

（4）单击 create 按钮，这就创建了 43 个尺寸优化的设计变量，分别是梁上 43 个 property 的厚度，其变化范围是 1.6～2.0。

（5）单击 return 按钮退出。

STEP 13 创建尺寸优化响应

（1）单击 response，在 response=后输入 disp_y，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static displacement。单击黄色 nodes 按钮，选择 by path。依次单击腹板底板中点及一个端点，选中腹板底部的一半节点，如图 9−54 所示。因为结构和载荷是对称的，所以只需选择一半节点。

（2）单击 create 按钮。

（3）在 response=后输入 VM_SHELL，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static stress。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 elems。

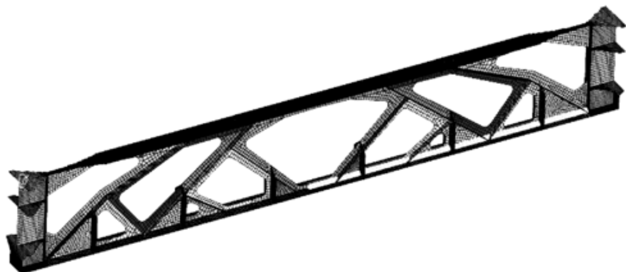


图 9−54　节点选择

（4）单击模型浏览器上的 Mask 选项卡，单击 1D 后的减号隐藏所有的 1D 单元。在梁的上缘条下缘条、腹板、立筋上分别选择一些单元，然后单击 elems 选择 by face，选中梁上一半的单元，如图 9−55 所示。

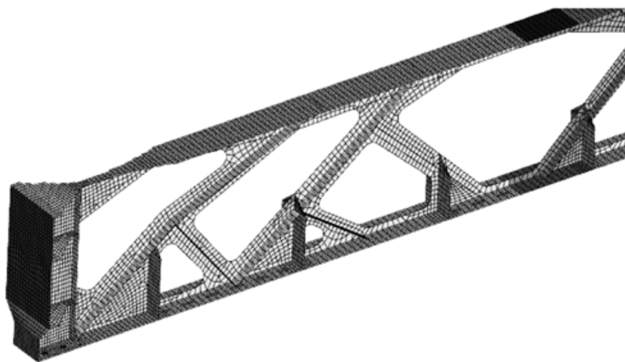


图 9−55　单元选择

（5）确保右侧选择为 von mises，并且其下方选择为 both surfaces。单击 create。

（6）在 response=后输入 M_beam，单击 response type 下方的三角箭头，选择 mass。单击 total 左侧的三角箭头，选择 by entity。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 mats。单击图形窗口中腹板上任意一个单元，然后单击 create 按钮，这就定义了名为 M_beam 的响应，其数值为整个梁的质量。

（7）在 response=后输入 VM_BEAM，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static stress。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 elems。

（8）在模型浏览器中用右键单击 Bars，然后在弹出的快捷菜单中选择 isolate only。按住〈Shift〉键的同时，在图形窗口中框选一半的 Beam 单元，如图 9−56 所示。



图 9−56　Beam 单元选择

（9）确保右侧选择为 all normal。单击 create 按钮。

（10）在 response=后输入 buckling，单击 response type 左侧的三角箭头，选择 buckling，在 Model number 后输入 1。单击 create，定义第一阶屈曲因子的响应。

（11）单击 return 按钮退出。

STEP 14 创建尺寸优化约束

（1）单击 dconstraints，在 constraint=后输入 disp_y，单击 response 选择已创建的响应 disp_y。

（2）勾选 lower bound 和 upper bound，在其后分别输入−3 和 3。单击 loadsteps，选择静态工况 1.33P。单击 create。

（3）在 constraint=后输入 VM_SHELL，单击 response 选择已创建的响应 VM_SHELL。

（4）勾选 upper bound，在其后输入 300。单击 loadsteps，选择静态工况 1.33P。单击 create。

（5）在 constraint=后输入 VM_BEAM，单击 response 选择已创建的响应 VM_BEAM。

（6）勾选 upper bound，在其后输入 300。单击 loadsteps，选择静态工况 1.33P。单击 create。

（7）在 constraint=后输入 buckling，单击 response 选择已创建的响应 buckling。

（8）勾选 lower bound，在其后输入 1。单击 loadsteps，选择线性屈曲工况 buckling。单击 create。

（9）单击 return 按钮退出。

STEP 15 创建目标函数

（1）单击 objective 按钮。

（2）确保左侧选择为 min，单击右侧的 response，选择创建的质量响应 M_beam。

（3）单击 create 按钮，再单击 return 按钮两次退出优化面板。

STEP 16 求解模型

（1）单击 Analysis 中的 OptiStruct 下的 OptiStruct，提交求解器计算。

（2）求解成功后单击 HyperView 查看结果。

STEP 17 后处理

在模型浏览器中单击 Iteration 5，选择最后一步迭代，单击工具栏上的 contour 按钮，确保 result type 下方选择为 Element Thickness，单击 Apply，查看优化后的单元厚度分布，如图 9−57 所示。

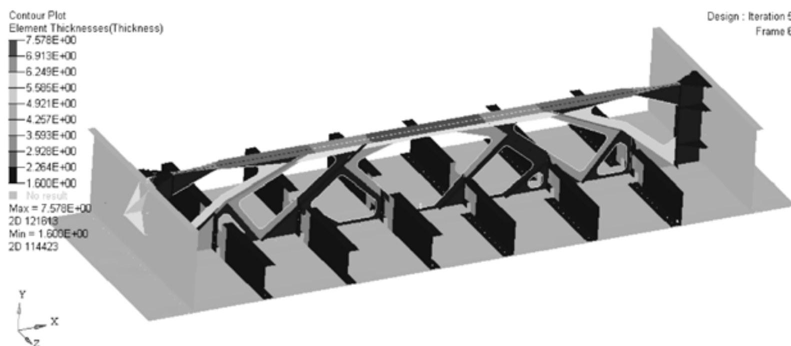


图 9–57　单元厚度分布

优化后横梁重量为 1.991kg，优化前后位移结果如图 9–58 所示。

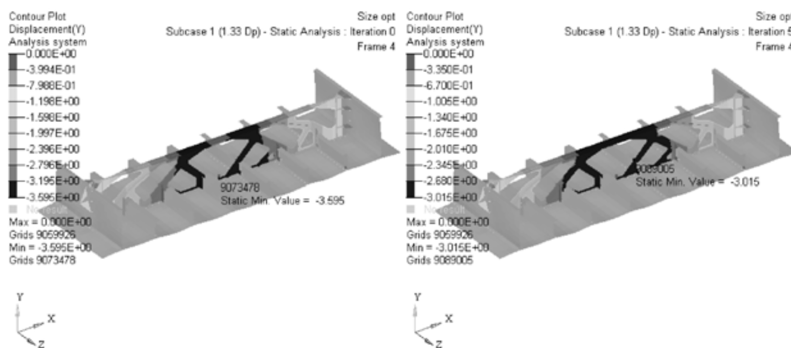


图 9–58　优化前后位移结果

9.3　实例：舱门横梁自由尺寸优化与尺寸优化

本实例采用自由尺寸优化的方法，对 9.2 节实例中的舱门进行自由尺寸优化和尺寸优化，读者可从这两个优化实例看到不同优化方法的区别。

STEP 01　启动 HyperMesh 并设置 OptiStruct 用户配置文件

（1）启动 HyperMesh，将弹出 User Profiles 对话框。
（2）在 User Profiles 对话框中，选择 OptiStruct。
（3）单击 OK 按钮。

STEP 02　导入模型文件

（1）单击工具栏上的 Import Solver Deck 按钮，选择模型文件 freesize_size_1.fem。
（2）单击 Open 按钮。

STEP 03 创建约束及载荷

（1）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮 。

（2）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 SPC。

（3）单击 card image 左侧的三角箭头选择 no card image。

（4）单击 create，创建一个名为 SPC 的 load collector。

（5）单击 Analysis 中的 constraints，确保进入 create 子面板。

（6）单击 nodes，选择 by id，在 id=后输入 1。选择 1 号节点。

（7）在右侧勾选 dof2、dof3、dof4、dof5。单击 create 按钮，在 1 号节点创建 2、3、4、5 自由度的约束。

（8）单击 nodes，选择 by id，在 id=后输入 1944。选择 1944 号节点。

（9）在右侧勾选 dof1、dof2、dof3、dof4、dof5。单击 create 按钮，在 1 号节点创建 1、2、3、4、5 自由度的约束。

（10）单击 nodes，选择 on plane，在 tolerance=后输入 0.5，然后依次单击如图 9-59 所示的 3 个节点。

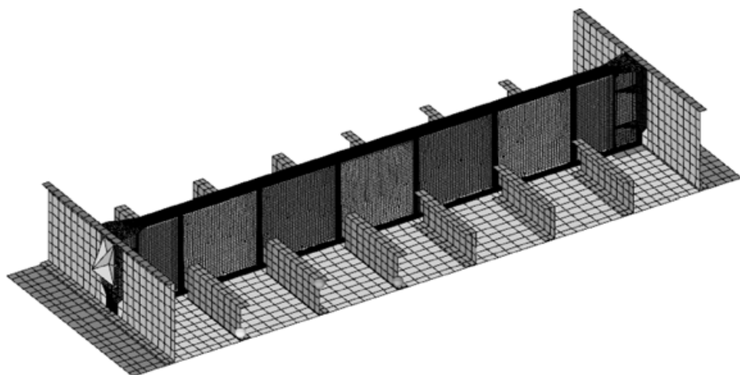


图 9-59　节点选择

（11）单击 select entities，选择结构一侧端面上的所有节点，如图 9-60 所示。

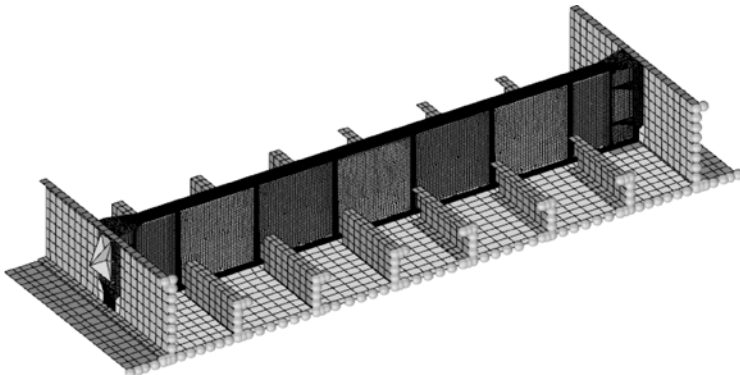


图 9-60　侧面节点选择

（12）重复步骤（10）和（11），选择另一侧端面上的所有节点。在右侧勾选 dof3、dof4、dof5。单击 create 按钮，在两侧节点上创建 3、4、5 自由度的约束。

（13）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮。

（14）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 pressure。

（15）单击 card image 左侧的三角箭头选择 no card image。

（16）单击 create 按钮，创建一个名为 pressure 的 load collector。

（17）单击 Analysis 中的 pressures，确保进入 create 子面板。

（18）单击 elems 选择 on plane，在 tolerance=后输入 0.8，然后单击底板上的 3 个节点。

（19）单击 select entities，选择底板上的所有单元。

（20）在 magnitude=后输入 0.062，然后单击 create 按钮。在底板上创建大小为 0.062MPa 的压力，如图 9-61 所示。

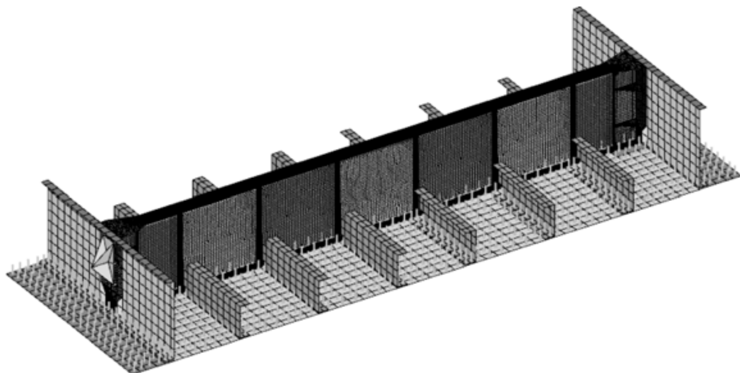


图 9-61　载荷施加

（21）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮。

（22）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 1.33P。

（23）单击 card image 左侧的三角箭头选择 card image。单击 card image 选择 LOAD，单击 create/edit 按钮，进入 LOAD 卡片编辑页面。

（24）在 S1(1)下输入 1.33，单击黄色 L1(1)按钮，在弹出的面板中选择已创建的 load collector：pressure。

（25）单击 return 按钮。

这样就创建了一个组合工况 1.33P，即为 1.33 倍的 pressure。

STEP 04 设置静态分析工况

（1）单击 Analysis 中的 load steps，确保在 type 的右侧显示为 linear static，否则单击三角箭头，选择 linear static。

（2）在 name=后输入 1.33P，勾选下方的 SPC、LOAD。单击 SPC 后的空白区域，选择 SPC，单击 LOAD 后的空白区域，选择 1.33P。单击 create。

（3）单击 return 按钮退出。

STEP 05 创建自由尺寸优化的设计变量

（1）单击模型浏览器上的 Mask 选项卡，单击 1D 和 Springs/Gaps 后面的减号，隐藏 1D 单元。

（2）单击模型浏览器上的 Model 选项卡，单击 show/hide 按钮，然后用右键单击图形窗口中不需要的部件使其隐藏，仅保留梁的上下缘条、腹板立筋，如图 9–62 所示。

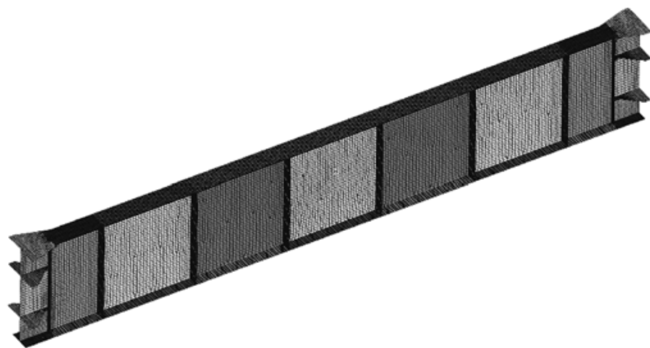


图 9–62　部件选择

（3）单击 Analysis 中的 optimization，再单击 freesize，确保进入 create 子面板。

（4）输入变量名 desvar=freesize。

（5）单击 type 下方的三角箭头，选择 PSHELL。

（6）单击 props，按〈Shift〉键的同时用鼠标左键框选图形窗口中显示的部件，一共 29 个。单击 return 按钮。

（7）单击 minimum thickness 前面的双向选择箭头，输入最小厚度 0.05。单击 maximum thickness 下方的双向选择箭头，输入最大厚度 20。

（8）单击 create 按钮。定义了名为 freesize 的尺寸优化设计变量。

（9）单击 return 按钮退出。

STEP 06 创建自由尺寸优化响应

（1）单击 responses。

（2）在 response=后输入 M_beam，单击 response type 下方的三角箭头，选择 mass。单击 total 左侧的三角箭头，选择 by entity。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 mats。单击图形窗口中腹板上任意一个单元，然后单击 create 按钮，这就定义了名为 M_beam 的响应，其数值为整个梁的质量。

（3）在 response=后输入 disp_y，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static displacement。单击黄色 nodes 按钮，选择 by path。依次单击腹板底板两个端点，选中腹板底部的所有节点，如图 9–63 所示。

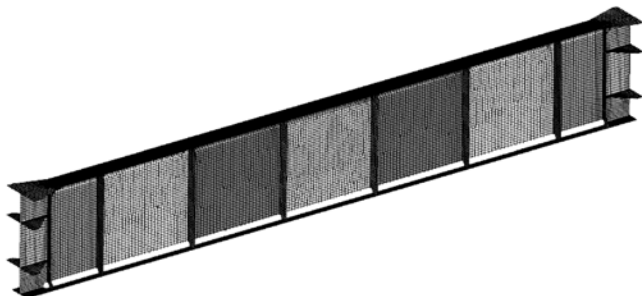


图 9-63　节点选择

（4）选择 dof2 前的单选按钮，单击 create 按钮。这就创建了名为 disp_y 的响应，其值为腹板底部所有节点 *y* 方向的位移。

（5）单击 return 按钮退出。

STEP 07 创建优化约束条件及目标函数

（1）单击 dconstraints。

（2）输入 constraint=disp_y，单击 response=后的空白区域，选择 disp_y。

（3）勾选 lower bound 和 upper bound 复选框，在它们后面分别输入−3 和 3，单击黄色 loadsteps 按钮，勾选 1.33P 复选框，单击 select。

（4）单击 create 按钮，这就定义了对响应 diap_y 的约束。在 1.33P 的工况下，其上下限分别为 3 和−3。

（5）单击 return 按钮。

（6）单击 objective，确保左侧显示为 min，否则单击三角箭头选择 min。

（7）单击 response=后面的空白区域，选择 M_beam，单击 create 按钮，这就创建了一个目标函数(M_beam)，最小化梁的质量。

（8）单击两次 return 按钮，退出优化面板。

STEP 08 优化求解

（1）单击 Analysis 中的 OptiStruct，单击 save as 按钮选择模型文件及结果文件的存放位置。

（2）单击 OptiStruct，开始求解模型。

（3）求解完成后关闭命令行窗口，返回到 HyperMesh 中。

STEP 09 结果后处理

（1）单击 HyperView，直接打开 HyperView 并自动导入结果文件。

（2）在模型浏览器中单击选择最后一个迭代步，单击工具栏上的 contour 按钮。单击黄色 components 按钮，在窗口中选择梁的各个部件，单击 Apply 查看优化后的单元厚度分

布，如图 9−64 所示。

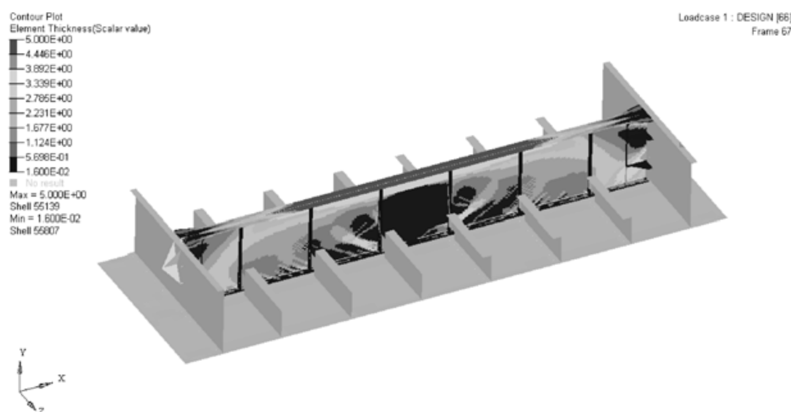


图 9−64　优化后的单元厚度分布

STEP 10 创建尺寸优化模型

（1）根据自由尺寸优化的结果创建新的模型，为尺寸优化作准备，单元尺寸为 5mm；或者单击工具栏上的 Import Solver Deck 按钮，选择模型文件 freesize_size_2.fem。

（2）单击 Open 按钮，导入如图 9−65 所示模型。

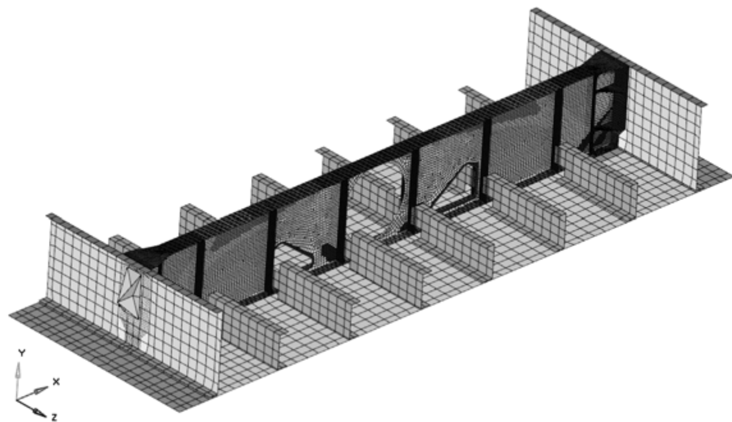


图 9−65　尺寸优化模型

STEP 11 创建屈曲分析工况

（1）单击工具栏上的 Load Collectors 按钮。

（2）选中 create 子面板，在 loadcol name 处输入 buckling。

（3）单击 card image 左侧的三角箭头选择 card image。单击 card image 选择 EIGRL，单击 create/edit 按钮，进入 EIGRL 卡片编辑页面。

（4）单击[V1]下方，输入 0。单击[V2]下方，输入 3。单击[ND]下方输入 5，如图 9-66 所示。

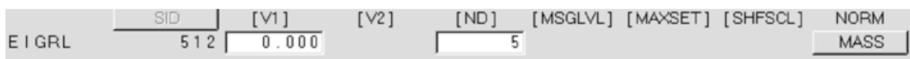


图 9-66　模态卡片创建

（5）单击 return 按钮退出。

（6）单击 Analysis 中的 load steps，确保在 type 的右侧显示为 linear static，否则单击三角箭头，选择 linear static。

（7）在 name=后输入 1.33P，勾选下方的 SPC、LOAD。单击 SPC 后的空白区域，选择 SPC。单击 LOAD 后的空白区域，选择 1.33P。单击 create 按钮，这就创建了一个静态分析工况。

（8）在 name=后输入 buckling，单击 type 右侧的三角箭头，选择 linear buckling。勾选下方的 SPC、STATSUB、METHOD（STRUCT）。单击 SPC 后的空白区域，选择 SPC。单击 STATSUB 后的空白区域，选择已创建的载荷工况 1.33P。单击 METHOD（STRUCT）后的空白区域，选择 buckling。单击 create，这就创建了一个线性屈曲分析工况。

STEP 12 创建尺寸优化设计变量

（1）单击 Analysis 中的 optimization，选择 gague，进入 gague 子面板。

（2）单击模型浏览器上的 Mask 选项卡，单击 1D 和 Springs/Gaps 后面的减号，隐藏 1D 单元。

（3）单击模型浏览器上的 Model 选项卡，单击 show/hide 按钮，然后用右键单击图形窗口中不需要的部件使其隐藏，仅保留梁的上缘条、下缘条、腹板、立筋。按住〈Shift〉键的同时框选图形窗口中显示的部件。选择 35 个 property，如图 9-67 所示。

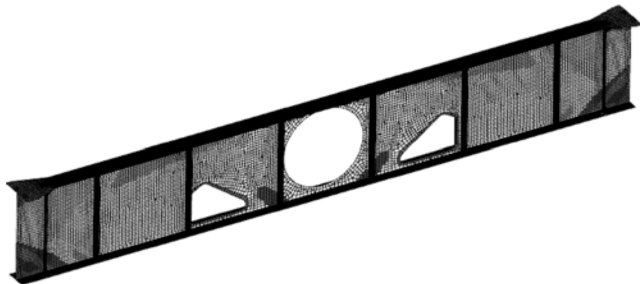


图 9-67　属性选择

（4）在 lower bound =后输入 1.6，在 upper bound=后输入 2.0，其余选项默认，如图 9-68 所示。

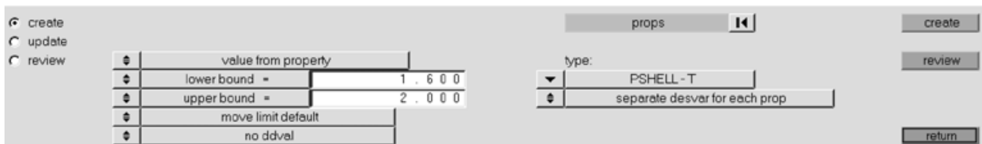


图 9-68　尺寸变量创建

（5）单击 create 按钮，创建了 35 个尺寸优化的设计变量，分别是梁上 35 个 property 的厚度，其变化范围是 1.6～2.0。

（6）单击 return 按钮退出。

STEP 13 创建尺寸优化响应

（1）单击 response，在 response=后输入 disp_y，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static displacement。单击黄色 nodes 按钮，选择 by path。依次单击腹板底板中点及一个端点，选中腹板底部的一半节点，如图 9−69 所示。因为结构和载荷是对称的，所以只需选择一半节点。

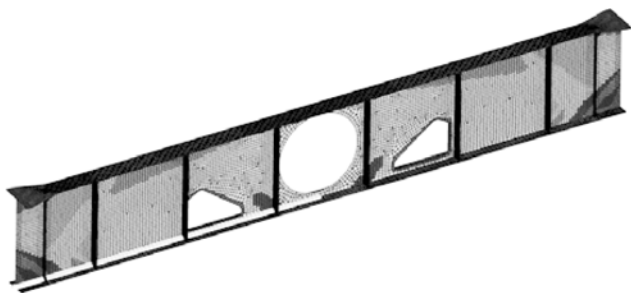


图 9−69　节点选择

（2）选择 dof2 前面的单选按钮，单击 create 按钮。

（3）在 response=后输入 VM_SHELL，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static stress。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 elems。

（4）单击模型浏览器上的 Mask 选项卡，单击 1D 和 Springs/Gaps 后面的减号，隐藏 1D 单元。在梁的上缘条和腹板上分别选择一些单元，然后单击 elems 选择 by face，选中梁上一半的单元，如图 9−70 所示。

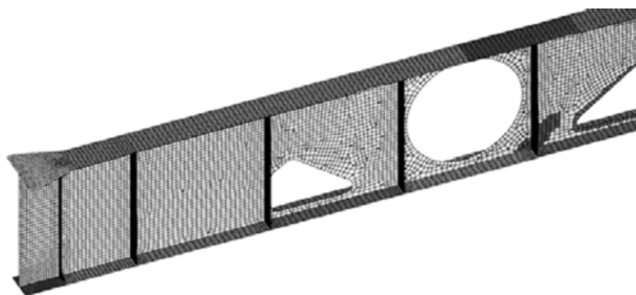


图 9−70　单元选择

（5）确保右侧选择为 von mises，并且其下方选择为 both surfaces。单击 create 按钮。

（6）在 response=后输入 M_beam，单击 response type 下方的三角箭头，选择 mass。单击 total 左侧的三角箭头，选择 by entity。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 mats。单击图形窗口中腹板上任意一个单元，然后单击 create 按钮，这就定义了名为 M_beam 的响应，其数值为整个梁的质量。

（7）在 response=后输入 VM_BEAM，单击 response type 下方的三角箭头，选择 static stress。单击 props 按钮左侧的三角箭头，选择 elems。单击 elems，选择 by collector，勾选 Bars 前的复选框，单击 select 选择 Bars 中的单元。

（8）确保右侧选择为 all normal。单击 create 按钮。

（9）在 response=后输入 buckling，单击 response type 左侧的三角箭头，选择 buckling，在 Model number 后输入 1。单击 create 按钮，定义第一阶屈曲因子的响应。

（10）单击 return 按钮退出。

STEP 14 创建尺寸优化约束

（1）单击 dconstraints，在 constraint=后输入 disp_y，单击 response 选择已创建的响应 disp_y。

（2）勾选 lower bound 和 upper bound，在其后分别输入−3 和 3。单击 loadsteps，选择静态工况 1.33P。单击 create 按钮。

（3）在 constraint=后输入 VM_SHELL，单击 response 选择已创建的响应 VM_SHELL。

（4）勾选 upper bound，在其后输入 300。单击 loadsteps，选择静态工况 1.33P。单击 create。

（5）在 constraint=后输入 VM_BEAM，单击 response 选择已创建的响应 VM_BEAM。

（6）勾选 upper bound，在其后输入 300。单击 loadsteps，选择静态工况 1.33P。单击 create。

（7）在 constraint=后输入 buckling，单击 response 选择已创建的响应 buckling。

（8）勾选 lower bound，在其后输入 1。单击 loadsteps，选择线性屈曲工况 buckling。单击 create 按钮。

（9）单击 return 按钮退出。

STEP 15 创建目标函数

（1）单击 objective。

（2）确保左侧选择为 min，单击右侧 response 选择创建的质量响应 M_beam。

（3）单击 create 按钮。

（4）单击 return 按钮两次退出优化面板。

STEP 16 求解模型

（1）单击 Analysis 中的 OptiStruct 下的 OptiStruct，提交求解器计算。

（2）求解成功后单击 HyperView 查看结果。

STEP 17 后处理

在模型浏览器中，单击 DESIGN [7]，选择最后一步迭代。单击

show/hide 按钮，然后用右键单击图形窗口中不需要显示的部件。单击工具栏上的 contour 按钮，确保 result type 下方选择为 Element Thickness，单击 Apply，查看优化后的单元厚度分布，如图 9−71 所示。

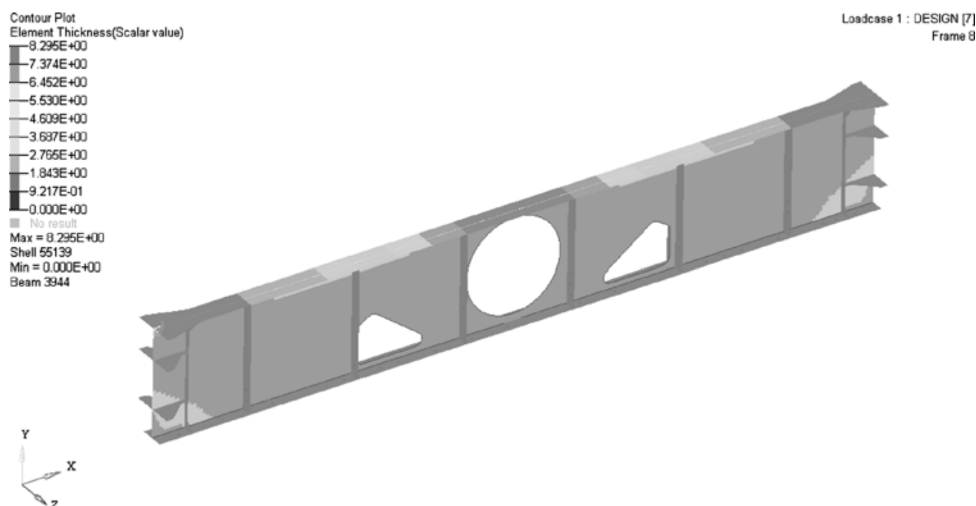


图 9−71 优化后的单元厚度分布

优化后横梁重量为 1.96829kg，优化前后位移结果如图 9−72 所示。

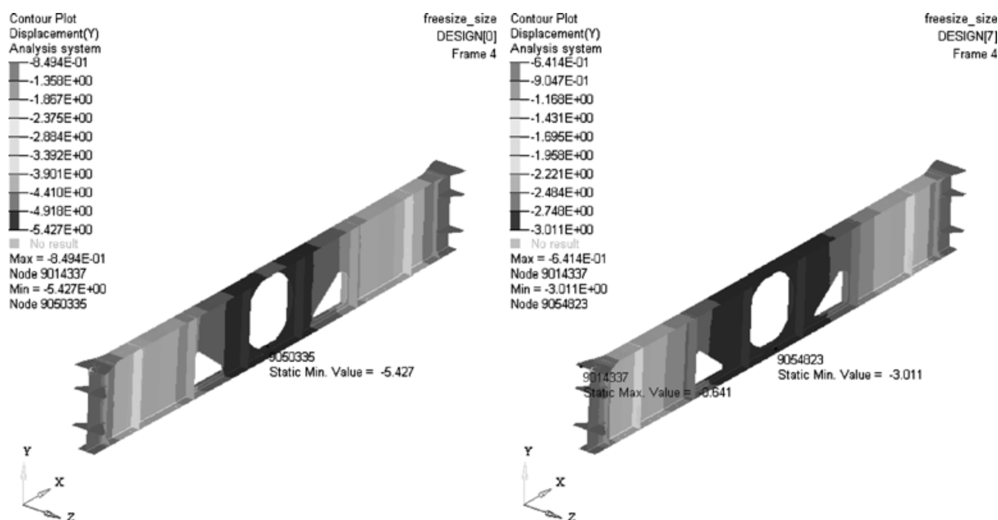


图 9−72 优化前后位移结果

9.4 实例：机身整体结构尺寸优化

本实例简单介绍如何对机身蒙皮长桁结构模型建立优化变量、响应及约束等，进行尺寸优化分析。典型的机身蒙皮长桁结构如图 9−73 所示。

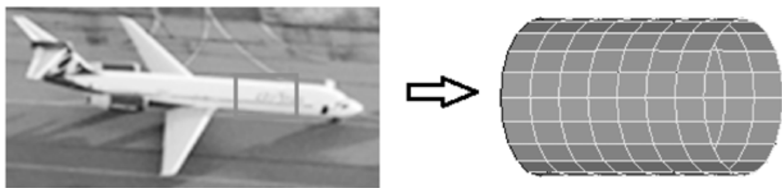


图 9-73　飞机机身蒙皮长桁结构

STEP 01　运行 HyperMesh，设置用户属性并打开模型文件

（1）运行 HyperMesh，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（2）单击 OK 按钮。

（3）在工具栏中单击“导入”按钮，并在模型导入面板中单击“导入有限元模型”按钮。

（4）单击 File: 后面的文件夹图标，打开“选择文件”对话框。

（5）在相应的路径下选择 demo4_1.fem 文件。

（6）单击 Import ，导入模型文件，如图 9-74 所示。

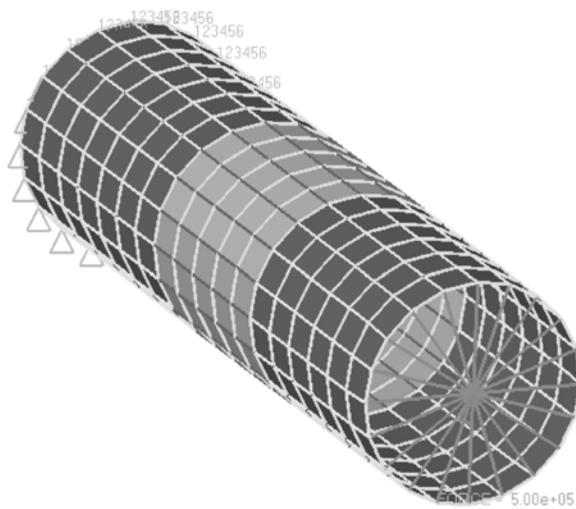


图 9-74　模型文件

模型中间部分为设计空间，两侧为非设计空间，灰色区域受压，以压剪稳定性作为优化约束，黄色区域受拉，以应力水平作为优化约束。

STEP 02　为蒙皮创建离散变量

（1）单击 Analysis 中的 optimization，选择 discrete dvs 子面板，设置如图 9-75 所示。from、to、increment 表示蒙皮厚度从 0.5 变化到 10，变化增量为 0.1。

（2）单击 create 按钮创建变量，然后单击 return 按钮。

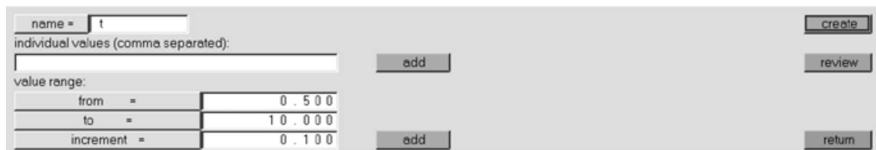


图 9-75　discrete dvs 面板

STEP 03　为受压端蒙皮优化空间区域创建设计变量和属性关联

（1）单独显示优化空间，用右键单击部件名 comp，在弹出的快捷菜单中选择 Isolate，如图 9-76 所示。

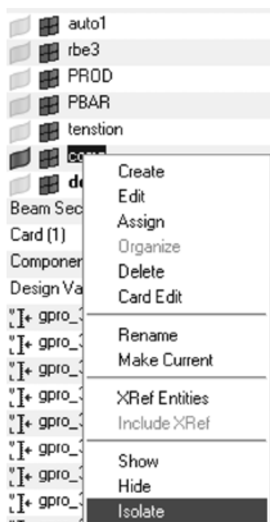


图 9-76　选择 Isolate

（2）在 optimization 面板下选择 gauge 子面板，设置如图 9-77 所示。

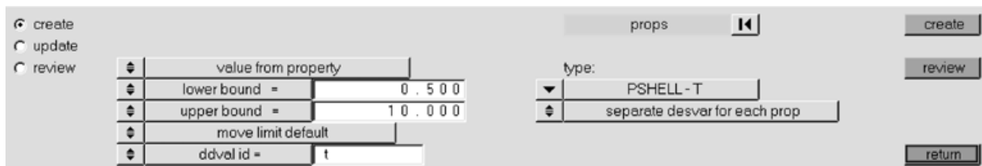


图 9-77　gauge 面板

（3）单击 ddval id 显示 STEP 02 创建的离散变量，如图 9-78 所示，用左键单击并选择它。



图 9-78　离散变量选择面板

（4）单击绿色线框高亮显示的 props，视图窗框选优化空间的所有属性，选择完后如图 9-79 所示。

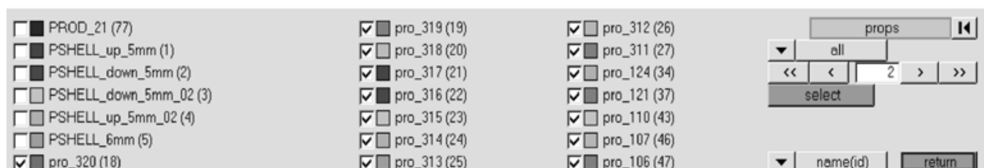


图 9-79　选择属性面板

（5）单击 select，返回 gauge 子面板，然后单击 create 按钮完成变量和关联属性的创建。单击 return 按钮退出面板。

（6）此时模型结构树中已生成 25 个 Design Variable 和 25 个 Property Relationship，它们是根据所选的 25 个单元属性创建的，显示如图 9-80 所示。

Design Variable (25)		Design Variable Property Relationship (25)	
gpro_320	1	~gpro_320	1
gpro_319	2	~gpro_319	2
gpro_318	3	~gpro_318	3
gpro_317	4	~gpro_317	4
gpro_316	5	~gpro_316	5
gpro_315	6	~gpro_315	6
gpro_314	7	~gpro_314	7
gpro_313	8	~gpro_313	8
gpro_312	9	~gpro_312	9
gpro_311	10	~gpro_311	10
gpro_124	11	~gpro_124	11
gpro_121	12	~gpro_121	12
gpro_110	13	~gpro_110	13
gpro_107	14	~gpro_107	14
gpro_106	15	~gpro_106	15
gpro_105	16	~gpro_105	16
gpro_104	17	~gpro_104	17
gpro_103	18	~gpro_103	18
gpro_102	19	~gpro_102	19
gpro_101	20	~gpro_101	20
gpro_98	21	~gpro_98	21
gpro_97	22	~gpro_97	22
gpro_95	23	~gpro_95	23
gpro_92	24	~gpro_92	24
gpro_91	25	~gpro_91	25

图 9-80　变量以及关联属性结构树图

STEP 04 为长桁创建设计变量

（1）关掉显示部件 comp，打开显示部件 design_prod。

（2）长桁初始面积为 A=130，对应半径为 r=12.87，定义优化变量范围为面积 A 为 100～500，对应半径为 11.28～25.23，单击软件左上角的 utility 面板 Utility Mask Model 。

（3）单击 Utility 面板下方 FEA 按钮旁边的 Opti 按钮 FEA Opti ，激活 Opti 面板，如图 9-81 所示。

（4）单击 PBAR, PROD Opti. ，弹出属性选择面板。

（5）用鼠标框选视图窗显示的所有长桁属性，单击面板右侧的 proceed 按钮。

此时软件左侧弹面板如图 9-82 所示。

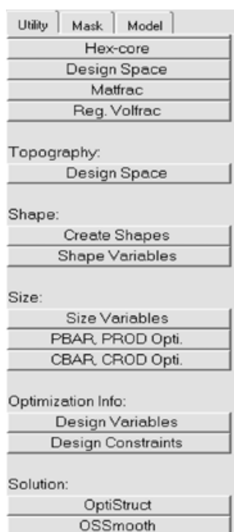


图 9-81 Utility 下的 Opti 面板

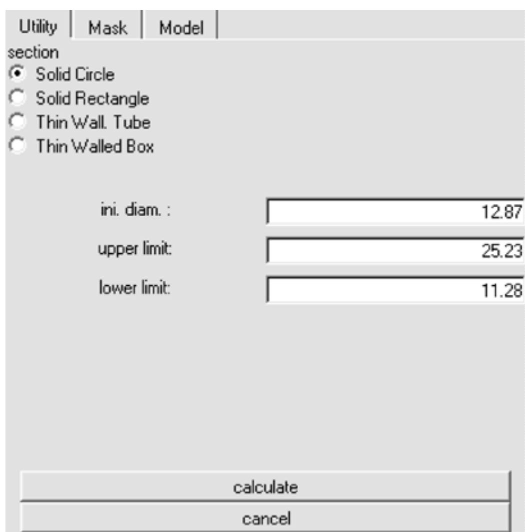


图 9-82 长桁变量设置面板

设置变量 ini.diam 初始值为 12.87，upper limit 为 25.23，lower limit 为 11.28，这里设置的是长桁的直径值，以直径来作为变量。

（6）单击 calculate。

此时模型结构树中新增了 20 个 Design Variable 和 20 个 Property Relationship，它们是根据所选的 20 个长桁单元属性创建的，同时产生了 20 个 Dequations，用来关联面积和直径，部分显示如图 9-83 和图 9-84 所示。

DV3	26	DVPA3	26
DV4	27	DVPA4	27
DV5	28	DVPA5	28
DV6	29	DVPA6	29
DV7	30	DVPA7	30
DV8	31	DVPA8	31
DV9	32	DVPA9	32
DV10	33	DVPA10	33
DV11	34	DVPA11	34
DV12	35	DVPA12	35
DV13	36	DVPA13	36
DV14	37	DVPA14	37
DV15	38	DVPA15	38
DV16	39	DVPA16	39
DV17	40	DVPA17	40
DV18	41	DVPA18	41
DV19	42	DVPA19	42
DV20	43	DVPA20	43
DV21	44	DVPA21	44
DV22	45	DVPA22	45

图 9-83 长桁变量属性关联结构树

Optimization Function (20)	
EQA3	1
EQA4	2
EQA5	3
EQA6	4
EQA7	5
EQA8	6
EQA9	7
EQA10	8
EQA11	9
EQA12	10
EQA13	11
EQA14	12
EQA15	13
EQA16	14
EQA17	15
EQA18	16
EQA19	17
EQA20	18
EQA21	19
EQA22	20

图 9-84　长桁面积与直径关系式

STEP 05 为受压端蒙皮创建 *x* 向（即沿长桁方向）的优化响应

（1）显示部件 comp，关掉显示部件 design_prod，单击 By Comp 右边的三角形，在弹出的下拉菜单中选择 By Prop，按属性显示单元，如图 9-85 所示。

（2）单击工具栏上的 按钮，在视图窗中框选所有单元，单击 on 按钮，显示所有单元 ID 号，如图 9-86 所示。

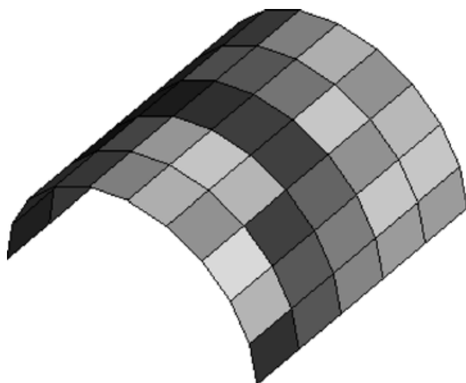


图 9-85　受压端蒙皮按属性显示

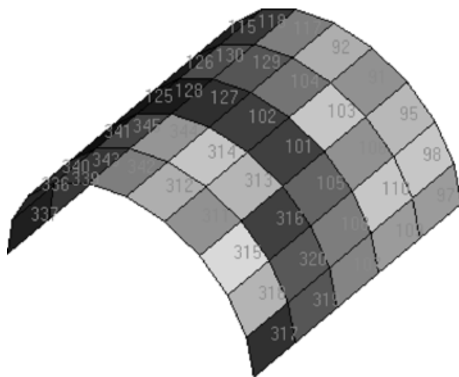


图 9-86　显示受压端蒙皮所有单元 ID 号

（3）单击 Analysis 中的 optimization，进入 responses 面板，输入响应名称 dresp_id。以单元 ID 号 320 为例，输入响应名称 dresp_320，选择 static stresses，将 props 切换成 elems，选择单元 ID 号为 320 和与该单元关于平面 *yOz* 对称的单元 338，面板新增选项如图 9-87 所示。

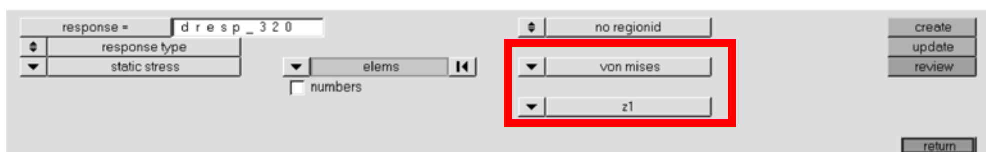


图 9-87　建立响应面板

（4）将 von mises 切换成 normal x 。

（5）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮。

（6）重复步骤（1）～（5）为设计空间每个相同属性的蒙皮创建响应，创建完成结构树显示，如图 9-88 所示。

STEP 06 为受压端蒙皮创建面内剪切应力优化响应

（1）同 STEP 05 ，只需将 normal x 变换为 shear xy 即可。

（2）重复为蒙皮创建响应，创建完成结构树显示如图 9-89 所示。

Optimization Response (25)	
dresp_320	1
dresp_319	2
dresp_318	3
dresp_317	4
dresp_316	5
dresp_315	6
dresp_314	7
dresp_313	8
dresp_312	9
dresp_311	10
dresp_124	11
dresp_121	12
dresp_110	13
dresp_107	14
dresp_106	15
dresp_105	16
dresp_104	17
dresp_103	18
dresp_102	19
dresp_101	20
dresp_98	21
dresp_97	22
dresp_95	23
dresp_92	24
dresp_91	25

图 9-88　蒙皮单元 *X* 向应力响应

dresp_sxy_320	26
dresp_sxy_319	27
dresp_sxy_318	28
dresp_sxy_317	29
dresp_sxy_316	30
dresp_sxy_315	31
dresp_sxy_314	32
dresp_sxy_313	33
dresp_sxy_312	34
dresp_sxy_311	35
dresp_sxy_124	36
dresp_sxy_121	37
dresp_sxy_110	38
dresp_sxy_107	39
dresp_sxy_106	40
dresp_sxy_105	41
dresp_sxy_104	42
dresp_sxy_103	43
dresp_sxy_102	44
dresp_sxy_101	45
dresp_sxy_98	46
dresp_sxy_97	47
dresp_sxy_95	48
dresp_sxy_92	49
dresp_sxy_91	50

图 9-89　蒙皮单元面内剪切应力

STEP 07 为受拉端蒙皮创建优化响应

（1）显示部件 tension，关掉显示部件 comp。

（2）受拉端蒙皮单元只有 3 个属性，分别为 PSHELL_5mm_01、PSHELL_5mm_02、

PSHELL_6mm_02，受拉端蒙皮不会发生屈曲，故以强度要求作为优化约束，这一步创建 6 个响应，分别为两个 5mm 属性单元 x 向应力和面内剪切应力，6mm 属性单元 x 向应力和面内剪切应力，命名为 ten_sx_6mm_02、ten_sxy_6mm_02、ten_sx_5mm_01、ten_sxy_5mm_01、ten_sx_5mm_02、ten_sxy_5mm_02，创建方法同上。

（3）创建完成结构树显示，如图 9-90 所示。

ten_sx_6mm_02	51
ten_sxy_6mm_02	52
ten_sx_5mm_01	53
ten_sxy_5mm_01	54
ten_sx_5mm_02	55
ten_sxy_5mm_02	56

图 9-90　受拉端蒙皮响应

STEP 08　为模型整体创建位移响应

（1）单独显示部件名为 rbe3 的部件，用右键单击部件名 rbe3，在弹出的快捷菜单中选择 isolate。

（2）单击 Analysis 中的 optimization，进入 responses 面板，输入响应名称 dis，将 static stress 切换成 static displacement。

（3）选择 rbe3 中间点，选中 total disp 单选按钮，如图 9-91 所示。



图 9-91　创建位移响应面板

（4）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮。

STEP 09　为蒙皮屈曲响应约束建立 dequation

优化考虑蒙皮的压剪强度，平板在剪切载荷作用下的初始屈曲应力为 $F_{s,cr}=K_s\eta_s E\left(\frac{t}{b}\right)^2$，平板在面内压缩载荷作用下的初始屈曲应力为 $F_{c,cr}=K_c\eta_c E\left(\frac{t}{b}\right)^2$，压剪稳定性应满足 $R_s^2+R_c<1$，这一步就是建立 $R_s^2+R_c$ 的关系式，其中 $R_s=\frac{sxy}{F_{s,cr}}$，$R_c=\frac{sx}{F_{c,cr}}$，sxy 和 sx 是响应中建立的蒙皮的面内剪切应力和沿长桁方向的压应力。

蒙皮长宽比 $\frac{a}{b}=\frac{416}{311}=1.34$，查《飞机设计手册》，$K_s$ 是剪切屈曲系数，取 K_s =6.5，K_c 是压缩屈曲系数，取 K_c =3.6，最后通过以上各式计算得到 $R_s^2+R_c$ 的关系式为 $R_s^2+R_c=\left(\frac{sxy}{25t^4}\right)^2+\frac{sx}{2.772t^2}$。

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 dequations 面板，在 dequation =

中输入 dequation 名称 MS。

（2）在下方输入压剪安全裕度关系式 $R_s^2 + R_c = \left(\frac{sxy}{F_{s,cr}}\right)^2 + \frac{sx}{F_{c,cr}}$ 的函数关系式，如图 9–92 所示。

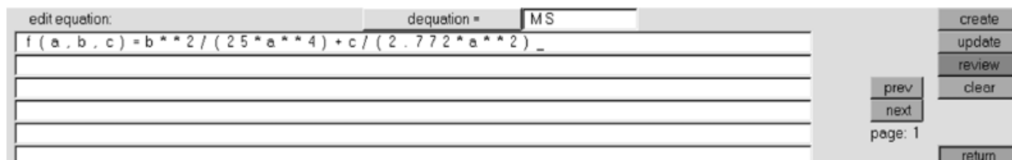


图 9–92　Dequation 建立面板

式 f（a,b,c）$=b$**2/（25*a**4）+c/（2.772*a**2）中的 a 引用 STEP 02 和 STEP 03 中创建的 Design Variable，即关联蒙皮厚度 t；b 引用 STEP 06 创建的蒙皮面内剪切应力 sxy；c 引用 STEP 05 创建的蒙皮 x 向（即沿长桁方向）的应力 sx。

（3）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮。至此，dequation 创建完毕。

STEP 10 为压剪安全裕度建立响应

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 responses 面板，输入响应名称 MS_id。以单元 ID 号 320 为例，输入响应名称 MS_320，switch static displacement to function，单击 dequation =，弹出如图 9–93 所示面板。



图 9–93　dequation 选择面板

（2）单击选择 MS，即为前面创建的 dequation。

（3）单击选择 MS，回到 response 面板，如图 9–94 所示。

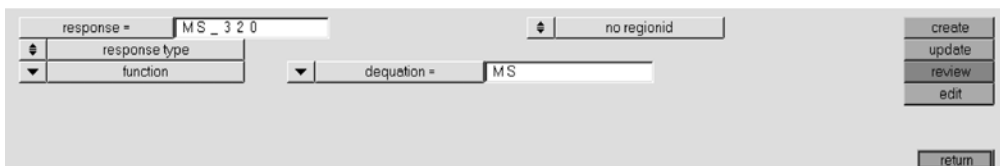


图 9–94　安全裕度响应建立面板

（4）单击 edit 按钮，进入如图 9–95 所示面板。

（5）勾选 DESIGN_VARIABLES 和 RESPONSES 复选框，弹出如图 9–96 所示文本框。



图 9-95 edit 响应面板

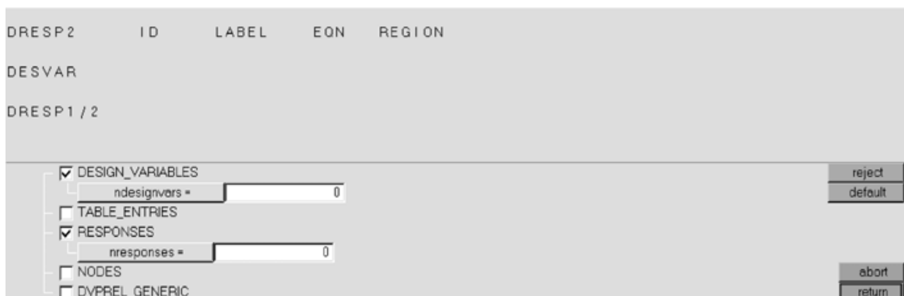


图 9-96 edit 响应面板

（6）分别在 ndesignvars = 和 nresponses = 文本框内输入 1 和 2，表示建立的该响应关联 1 个设计变量和 2 个响应，1 个设计变量是指前面建立的蒙皮厚度变量，2 个响应分别是蒙皮面内剪切应力和单元 x 向应力，输入数字后面板显示如图 9-97 所示。



图 9-97 输入数字后面板显示

（7）单击 desvar(1) 按钮，desvar(1) 会高亮显示，再次单击，则弹出变量选择面板，如图 9-98 所示。

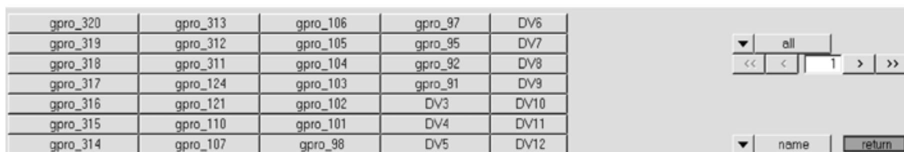


图 9-98 变量选择面板

（8）选择 gpro_320 ，类似选择两个响应，分别对应 dresp_sxy_320 和 dresp_320，即为蒙皮面内剪切应力和单元 *x* 向应力，建立好的面板如图 9-99 所示。



图 9-99　编辑裕度响应

（9）单击 return 按钮，返回 responses 面板。

（10）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮。

（11）重复步骤（1）～（8），为每个蒙皮响应建立安全裕度响应。

STEP 11 为蒙皮受拉端建立约束

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 dconstrains 面板，输入约束名称 ten_sx_5mm_01，单击 response = ，弹出选择面板，选择 STEP 07 建立的响应 ten_sx_5mm_01。

（2）勾选 upper bound = ，在后面的文本框中输入约束值 140，它表示约束蒙皮单元 *x* 方向应力不超过 140MPa。

（3）单击高亮显示的 loadsteps 。

（4）单击鼠标右键，选中 sub 工况前面的方框 sub ，然后单击 return。

（5）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮创建完成。

（6）重复进行步骤（1）～（4），分别创建约束 ten_sxy_5mm_01、ten_sx_5mm_02、ten_sxy_5mm_02、ten_sx_6mm_02 、ten_sxy_6mm_02，选择对应的响应和工况，*x* 方向应力约束 140MPa，面内剪切应力约束 28MPa。

STEP 12 为压剪安全裕度建立约束

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 dconstrains 面板，输入约束名称 MS_id。以单元 ID 号为 317 的单元为例，输入约束名称 MS_320，单击 response = ，弹出选择面板，选择 STEP 10 建立的响应 MS_320，并选择相应工况。

（2）勾选 upper bound = ，在后面的文本框中输入约束值 1，它表示安全裕度小于 1。

（3）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮创建完成。

（4）重复步骤（1）和（2），为每个响应建立约束。创建完成后，结构树显示如图 9-100 所示。

MS_320	58
MS_319	59
MS_318	60
MS_317	61
MS_316	62
MS_315	63
MS_314	64
MS_313	65
MS_312	66
MS_311	67
MS_124	68
MS_121	69
MS_110	70
MS_107	71
MS_106	72
MS_105	73
MS_104	74
MS_103	75
MS_102	76
MS_101	77
MS_98	78
MS_97	79
MS_95	80
MS_92	81
MS_91	82

图 9-100　安全裕度响应建立完成

STEP 13 为整体模型建立位移约束

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 dconstrains 面板，输入约束名称 dis，单击 response = ，弹出选择面板，选择 STEP 08 建立的响应 dis，选择相应工况。

（2）勾选 upper bound = ，在后面的文本框中输入约束值 82，它表示 STEP 08 建立响应的那个点位移不能超过 82mm。

（3）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮创建完成。

STEP 14 为长桁轴应力创建响应

（1）单独显示部件 design_prod，单击 Analysis 中的 optimization，进入 responses 面板，输入响应名称 crod，选择 static stresses，switch props to elems，面板显示如图 9-101 所示。



图 9-101　长桁应力响应建立面板

（2）在视图窗中框选显示的所有 design_prod 部件里面的长桁单元，选择单元后面板显示如图 9-102 所示。

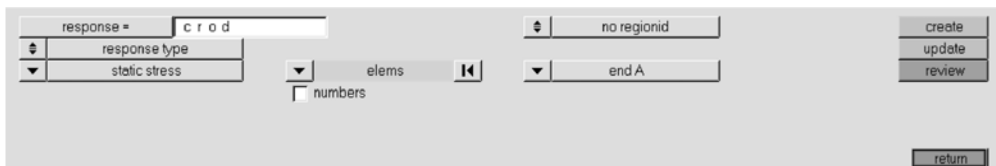


图 9-102　长桁应力响应建立面板

（3）end A 默认选择 end A 即可，单击 create 按钮，然后单击 return 按钮创建完成。

STEP 15　为长桁创建轴应力约束

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 dconstrains 面板，输入约束名称 crod，单击 response =，弹出选择面板，选择 STEP 14 建立的响应 crod，并选择相应工况。

（2）由于长桁单元既有受拉的长桁，又有受压的长桁，所以这里创建约束与之前不一样，需约束上下限，勾选 lower bound = 和 upper bound =，在后面的文本框中分别输入约束值-150 和 150，它表示长桁轴应力约束在-150～150MPa 之间。

（3）单击高亮显示的 loadsteps。

（4）单击鼠标右键，选中 sub 工况前面的方框 sub，然后单击 return 按钮。

（5）此时，约束面板如图 9-103 所示。



图 9-103　长桁应力约束建立面板

（6）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮创建完成。

STEP 16　为受拉端蒙皮建立设计变量和关系属性

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 size 面板，输入变量名称 ten_6mm_02，初始值输入 6，下限输入 0.5，上限输入 10， switch no ddval to ddval =，单击 ddval =，选择 STEP 02 建立的离散变量 *t*，如图 9-104 所示。

（2）单击 create 按钮，然后选择 generic relationship ，在 name = 后输入名称 ten_6mm_02，单击高亮显示的 props prop，选择 PSHELL_6mm_02，然后双击

designvars，弹出如图 9-105 所示面板。

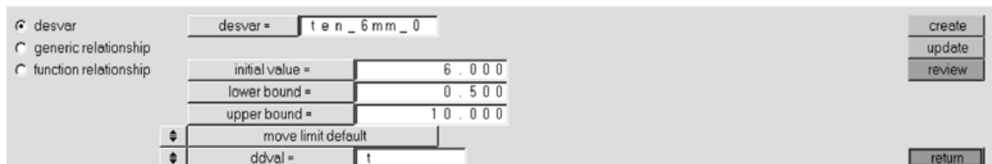


图 9-104　受拉端蒙皮尺寸优化变量建立面板

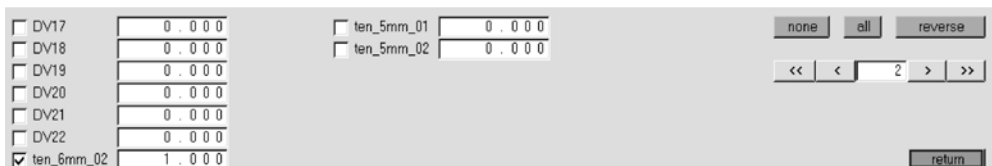


图 9-105　属性关联变量面板

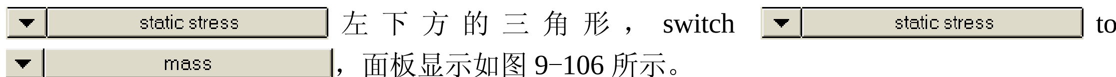
（3）选中 ten_6mm_02，然后单击 return 按钮返回 size 面板。

（4）单击 create 按钮创建完成，单击 return 按钮退出 size 面板。

（5）重复步骤（1）~（3），分别建立变量 ten_5mm_01、ten_5mm_02，并关联相关属性 PSHELL_5mm_01、PSHELL_5mm_02。

STEP 17　为整体模型创建质量响应

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 responses 面板，输入响应名称 mass，单击



static stress 左下方的三角形，switch static stress to mass，面板显示如图 9-106 所示。

response = mass
response type
mass
total
no regionid
create
update
review
return

图 9-106　质量响应建立面板

（2）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮创建完成。

STEP 18　为整体模型创建优化目标

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 objective 面板，选择最小化 min。

（2）单击 response =，弹出选择面板，选择 STEP 16 建立的质量响应 mass 作为设计目标。

（3）单击 create 按钮，然后单击 return 按钮，创建完成。

STEP 19 提交运算

（1）单击 Analysis 中的 OptiStruct 面板，如图 9-107 所示。

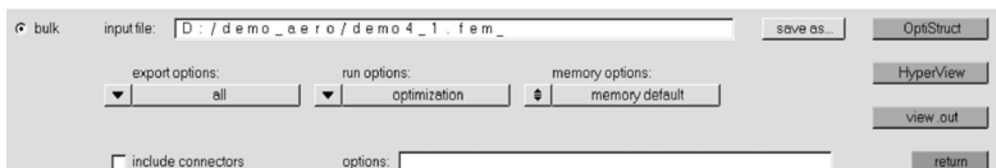


图 9-107 提交运算面板

（2）单击 OptiStruct，提交运算。运算结束后单击 HyperView，查看厚度分布结果，如图 9-108 所示。

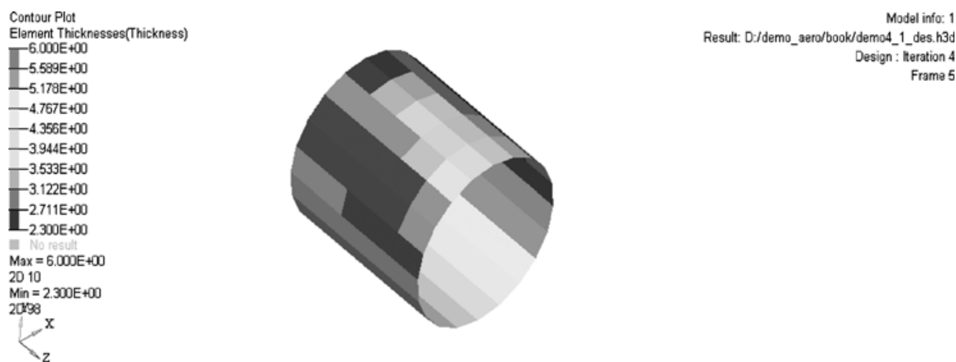


图 9-108 厚度分布结果

（3）单击右下角的三角形按钮，选择打开 HyperGraph 2D，操作方法如图 9-109 所示。

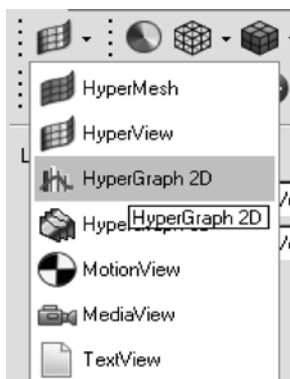


图 9-109 打开 HyperGraph 2D

（4）打开工作目录下扩展名为.hgdata 的文件，如图 9-110 所示。



图 9-110　显示优化目标值曲线面板

（5）单击 Optimization 中的 Objective 下的 Value，然后单击 Apply，显示曲线如图 9-111 所示。

图 9-111　优化过程质量变化曲线

优化进行 4 次迭代，初始点为 0.822，表示初始质量为 0.822t，优化结束后质量为 0.810t，曲线表示每次优化的结果，即每次优化目标质量的结果，这个质量是包括设计空间和非设计空间的总体质量，当然之前建立响应的时候也可以选择优化空间作为质量优化目标响应，这时打开看到的曲线只是显示优化空间质量的变化。

（6）打开工作目录下的.out 文件，可以看到优化过程的相关信息，例如优化开始第 1 步，违反约束的选项清晰地列出来，如图 9-112 所示。

MOST VIOLATED CONSTRAINTS TABLE

Response User-ID	Type	Response Label	Subcase /RANDPS +Frqncy	Grid/ Element/ MID/PID/ Mode No.	DOF/ Comp /Reg	Response Value		Objective Reference/ Constraint Bound	Viol. %
83	STRES	CROD	1		SA	-2.069E+02	>	-1.500E+02	37.9V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.953E+02	>	-1.500E+02	30.2V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.953E+02	>	-1.500E+02	30.2V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.896E+02	>	-1.500E+02	26.4V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.784E+02	>	-1.500E+02	18.9V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.784E+02	>	-1.500E+02	18.9V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.705E+02	>	-1.500E+02	13.6V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.628E+02	>	-1.500E+02	8.5V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.628E+02	>	-1.500E+02	8.5V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.559E+02	>	-1.500E+02	6.6V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.559E+02	>	-1.500E+02	6.6V
83	STRES	CROD	1		SA	-1.519E+02	>	-1.500E+02	1.3V

图 9-112　Iteration 1 响应违反约束信息图

红色线框表示违反约束的程度。每优化一步，违反约束的响应就减少，优化到第 3 步

时，仅两个响应违反约束，如图 9-113 所示。

MOST VIOLATED CONSTRAINTS TABLE

Response Type User-ID	Response Label	Subcase /RANDPS +Frqncy	Grid/ Element/ MID/PID/ Mode No.	DOF/ Comp /Reg	Response Value	Objective Reference/ Constraint Bound	Viol. %
61 EQATN	MS_317	1	--	--	1.039E+00	< 1.000E+00	3.9V
61 EQATN	MS_317	1	--	--	1.034E+00	< 1.000E+00	3.4V

图 9-113　Iteration 3 响应违反约束信息图

优化到最后一步，全部约束满足要求。

蒙皮厚度优化结果如图 9-114 所示。

DESIGNED PROPERTY ITEMS TABLE

DVPREL1/2	USER-ID	PROP-TYPE	PROP-ID	ITEM-CODE	PROP-VALUE
DVPREL1	1	PSHELL	18	T	2.700E+00
DVPREL1	2	PSHELL	19	T	2.600E+00
DVPREL1	3	PSHELL	20	T	2.800E+00
DVPREL1	4	PSHELL	21	T	2.600E+00
DVPREL1	5	PSHELL	22	T	2.600E+00
DVPREL1	6	PSHELL	23	T	2.900E+00
DVPREL1	7	PSHELL	24	T	4.300E+00
DVPREL1	8	PSHELL	25	T	3.300E+00
DVPREL1	9	PSHELL	26	T	4.700E+00
DVPREL1	10	PSHELL	27	T	3.600E+00
DVPREL1	11	PSHELL	28	T	2.900E+00
DVPREL1	12	PSHELL	29	T	2.400E+00
DVPREL1	13	PSHELL	30	T	2.500E+00
DVPREL1	14	PSHELL	31	T	2.700E+00
DVPREL1	15	PSHELL	32	T	2.500E+00
DVPREL1	16	PSHELL	33	T	2.500E+00
DVPREL1	17	PSHELL	34	T	3.200E+00
DVPREL1	18	PSHELL	35	T	2.900E+00
DVPREL1	19	PSHELL	36	T	3.700E+00
DVPREL1	20	PSHELL	37	T	2.900E+00

图 9-114　蒙皮厚度优化结果

截图只是部分结果，红色线框表示蒙皮厚度优化后的结果。

长桁面积优化结果如图 9-115 所示。

DVPREL2	32	PROD	64	A	3.244E+02
DVPREL3	33	PROD	65	A	9.995E+01
DVPREL4	34	PROD	66	A	9.995E+01
DVPREL5	35	PROD	67	A	9.995E+01
DVPREL6	36	PROD	68	A	9.995E+01
DVPREL7	37	PROD	69	A	1.614E+02
DVPREL8	38	PROD	70	A	9.995E+01
DVPREL9	39	PROD	71	A	9.995E+01
DVPREL10	40	PROD	72	A	1.032E+02
DVPREL11	41	PROD	73	A	2.417E+02
DVPREL12	42	PROD	74	A	1.088E+02
DVPREL13	43	PROD	75	A	9.995E+01
DVPREL14	44	PROD	76	A	1.858E+02
DVPREL15	45	PROD	77	A	1.131E+02

图 9-115　长桁面积优化结果

截图只是部分结果，红色线框表示长桁面积优化后的结果。

9.5　小结

OptiStruct 结构优化技术在飞机设计中的应用已经非常成熟，在国内外的飞机结构减重设计方面取得了大量工程成果，并能提高结构性能和设计效率，是现代飞机设计不可缺少的技术。本章的 4 个实例演示了飞机金属结构优化设计所用到的一些常见软件操作和处理方法，具体项目还需结合大量工程经验才能得到实用的结果。

利用 OptiStruct 进行飞机结构优化设计，不但可以取得明显的减重效果，而且还具有以下两个优点：

- 零部件传力路径合理，应力分布均匀。结构优化技术能够在给定的设计空间找出最佳的传力路径，并优化结构的最佳尺寸，使得零部件能够以最佳的材料分布去承受各种载荷，从而使应力分布均匀，取得良好的抗疲劳性能。
- 提高设计效率，缩短设计周期。基于结构优化技术进行设计能大大减少人工设计的反复迭代过程，从而加快设计速度。

第 10 章

航天行业优化实例



航天行业的产品种类很多，如火箭、导弹、卫星、飞船、着陆器等，结构形式不一，但都有减轻结构重量、提高结构效率的要求。OptiStruct 在全球航天领域已经有许多成功的应用，如 NASA、ATK、EADS、ISRO 等都采用 OptiStruct 进行产品优化设计。

本章重点知识

10.1　实例：导弹结构的自由形状优化
10.2　实例：卫星盖板的形貌优化
10.3　小结

10.1　实例：导弹结构的自由形状优化

本实例演示如何使用 OptiStruct 对导弹喷气发动机支撑结构（见图 10-1）进行自由形状优化。

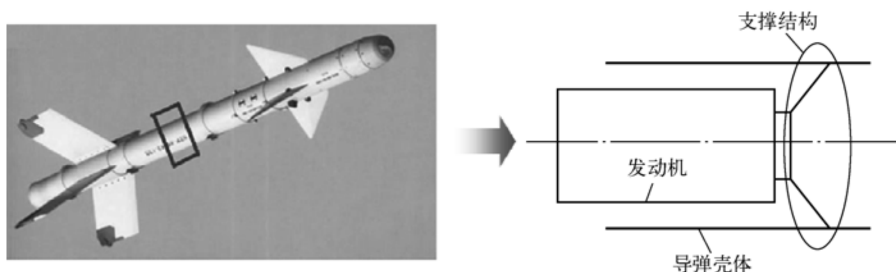


图 10-1　某导弹的发动机支撑结构

本实例将优化支撑结构的开口形状，包括下列内容：

✓ 创建自由形状优化变量。
✓ 创建优化响应。
✓ 创建优化目标。
✓ 查看优化结果。
✓ 应用优化结果。

STEP 01　运行 HyperMesh，设置用户属性并打开模型文件

（1）运行 HyperMesh，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct。

（2）单击 OK 按钮。

（3）在工具栏上单击“导入”按钮，并在模型导入面板中单击“导入有限元模型”按钮。

（4）单击 File: 后面的文件夹图标，弹出“选择文件”对话框。

（5）在相应的路径下选择 free_shape.fem 文件。

（6）单击 Import，导入模型文件，如图 10-2 所示。

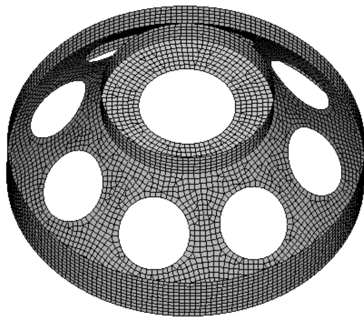


图 10-2　支撑结构网格模型

查看模型可以发现，模型中已经设置好模型的材料属性以及工况，本实例重点介绍如何使用 HyperMesh 进行自由形状优化的相关设置。

STEP 02 创建自由形状优化变量

（1）单击 Analysis 中的 optimization，进入 free shape 面板，如图 10-3 所示。

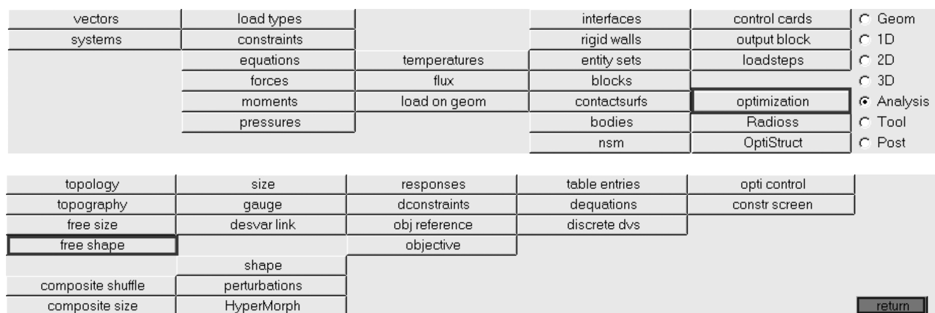


图 10-3　进入 free shape 面板

（2）单击 free shape 面板下的 free shape 按钮，进入自由尺寸优化变量创建面板，如图 10-4 所示。

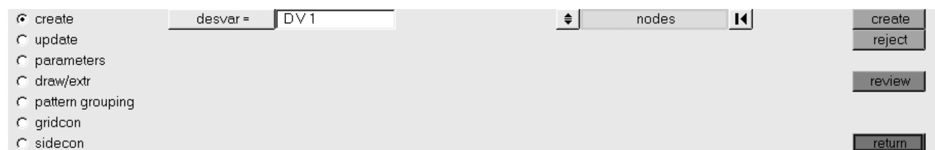


图 10-4　自由尺寸优化变量创建面板

（3）在 desvar=中输入优化变量的名字 DV1。

（4）单击 desvar=右侧的 nodes 按钮，并选择 by path，如图 10-5 所示。

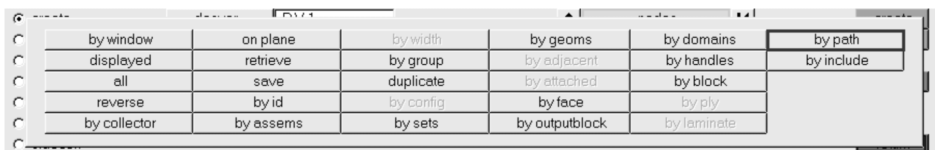


图 10-5　by path 在面板中的位置

（5）在模型中选择其中一个圆形区域上的节点，如图 10-6 所示。

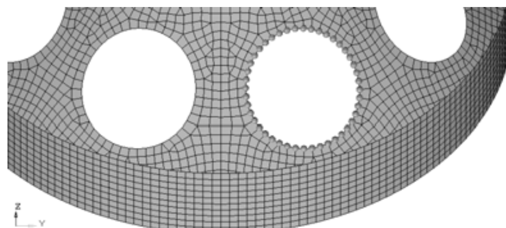


图 10-6　选择开口区域的节点

（6）单击 create，创建关于所选节点的形状变量 DV1。

（7）用同样的方法，建立关于其他开口区域处的优化变量，名称分别为 DV2～DV8。创建完成后，模型树的变量显示如图 10-7 所示。

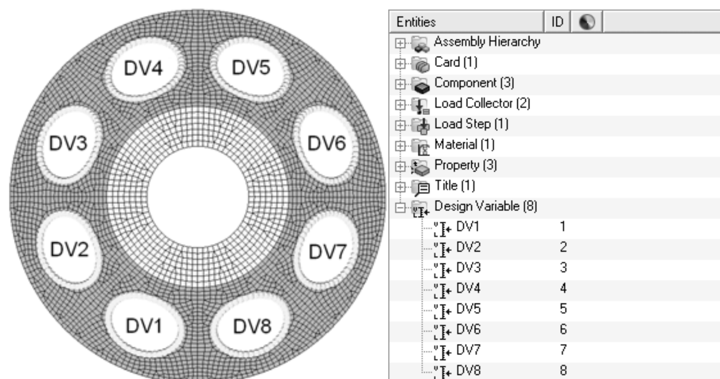


图 10-7　变量创建完成后的模型树

STEP 03 创建优化响应

（1）单击 optimization 中的 responses，进入响应创建面板，如图 10-8 所示。

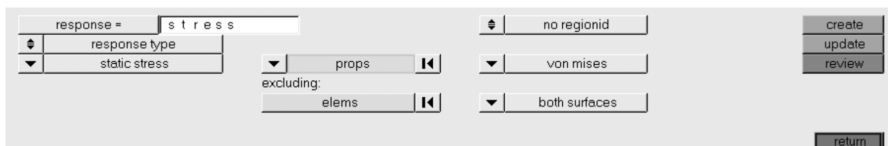


图 10-8　响应创建面板

（2）在 response=中输入响应名称 stress，单击 response type 下的类型选择按钮，并在弹出的选择面板中选择 static stress。响应范围选择 props，单击模型中的支撑结构（蓝色部分）以选择该部分属性，如图 10-9 所示。

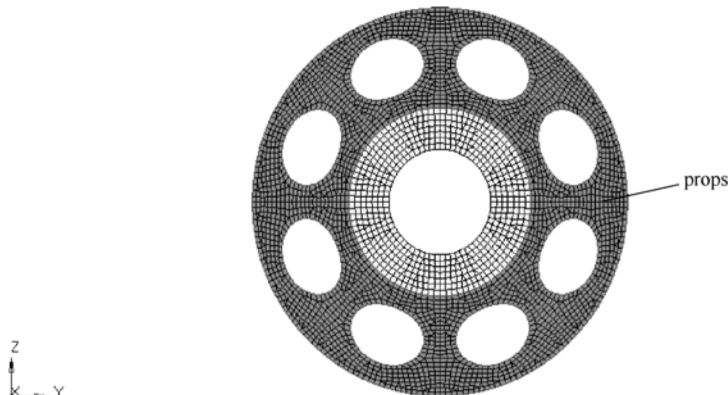


图 10-9　单击选取开口所在部件属性

（3）应力类型选择 von mises，并考虑壳单元的两面（both surfaces）。

（4）单击 create 创建应力响应。

（5）在 response=中输入 vol，并在 response type 中选择 volume，范围选择 total，如图 10-10 所示。

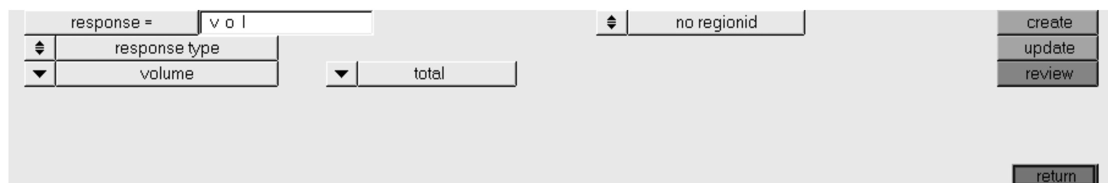


图 10-10　体积响应面板

（6）单击 create 创建体积响应。

STEP 04 创建优化约束

本模型中，优化约束为设计空间应力约束 125MPa。

（1）单击 optimization 中的 dconstraints，进入约束创建面板，如图 10-11 所示。

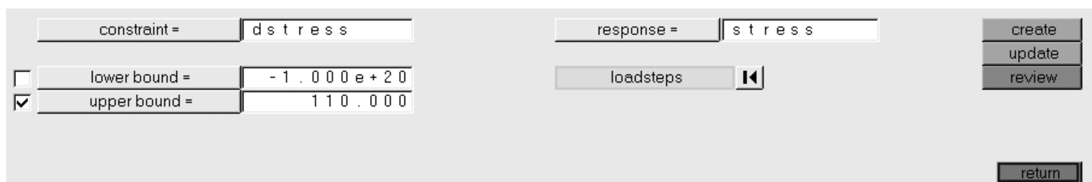


图 10-11　约束创建面板

（2）在 constraint=后的文本框中输入约束名称 dstress，单击 response=选择应力响应。此时弹出 loadsteps 选择按钮，单击并选择模型中的工况。勾选 upper bound =前面的复选框，并在其后的文本框中输入应力约束值 125MPa。

（3）单击 create 创建应力约束。

STEP 05 创建优化目标

本模型的优化目标为模型的整体体积最小（质量最轻）。

（1）单击 optimization 中的 objective，进入优化目标创建面板，如图 10-12 所示。



图 10-12　优化目标创建面板

（2）选择目标类型为 min，单击 response=并选择体积响应 vol。

（3）单击 create 创建优化目标。

STEP 06 递交求解

（1）单击 Analysis 中的 OptiStruct，再单击 save as 按钮，将文件另存到相应的文件夹下，并命名为 free_shape_opti.fem，如图 10-13 所示。

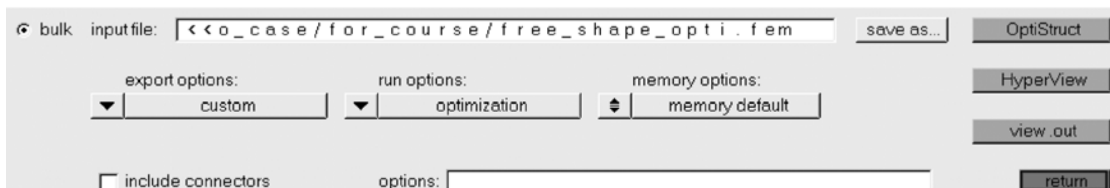


图 10-13 任务提交面板

（2）单击 OptiStruct 求解计算。

STEP 07 查看优化结果

优化迭代计算 11 步后收敛，约束全部满足并且目标达到最小。

（1）在 OptiStruct 面板中单击 HyperView，结果文件将自动导入。

（2）在左边结果控制区域的第二栏中选择 Design，在第三栏中选择迭代步，如图 10-14 所示。一般情况下选择最后一步，查看最后一步的最优结果。

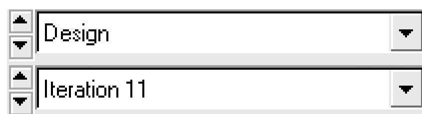


图 10-14 选择优化工况和迭代步进行查看

（3）选择 Counter 按钮并单击，设置如图 10-15 所示，并单击 Apply 按钮。

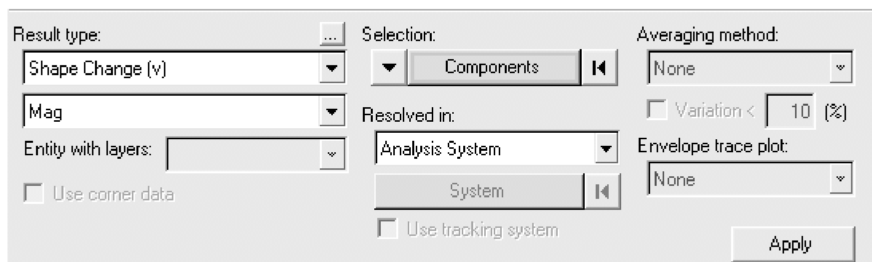


图 10-15 形状变化云图面板

（4）优化形状变化如图 10-16 所示。

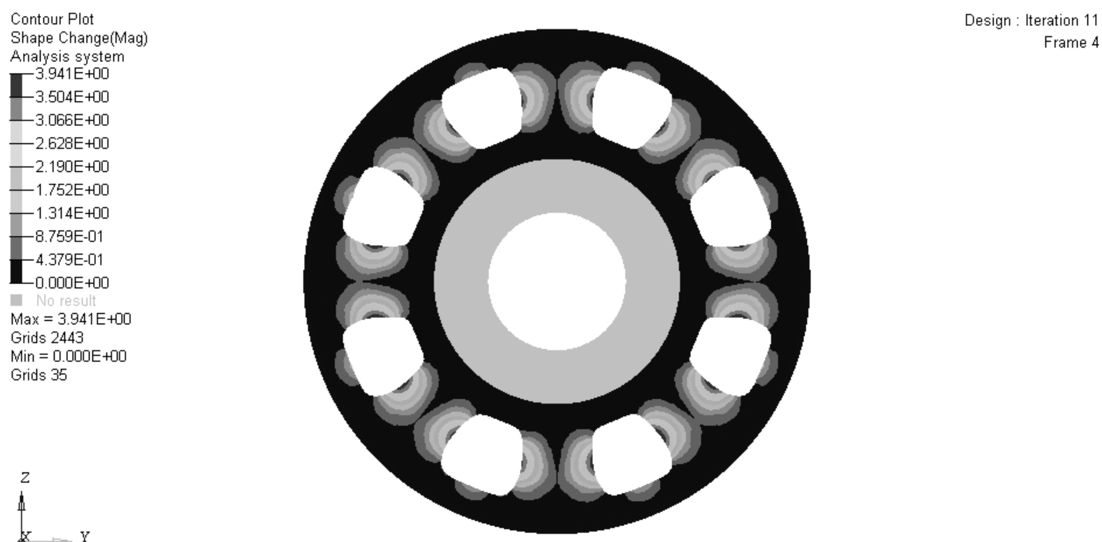


图 10-16　优化形状结果

（5）比较优化前后的形状变化。单击 HyperView 中的“窗口模式”按钮，选择两列模式，如图 10-17 所示。

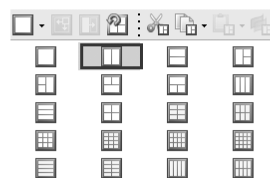


图 10-17　窗口模式选择

（6）在两个窗口中打开优化计算后的结果文件 free_shape_opti_s1.h3d。左侧窗口显示 iteration 0，右侧窗口选择 iteration11。对照可以得到优化前后开口区域形状变化，如图 10-18 所示。

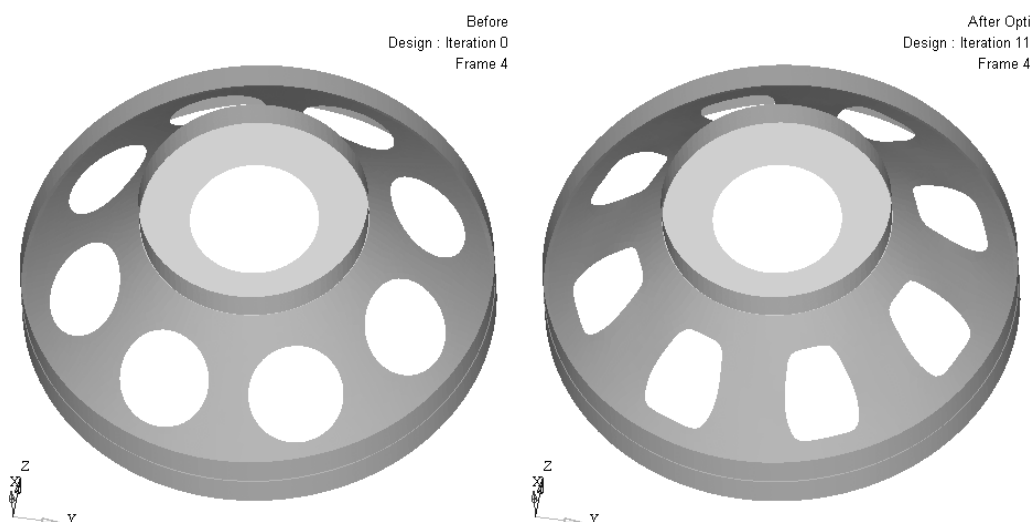


图 10-18　优化前后形状比较

（7）查看优化后设计空间前后应力分布变化。用同样的操作打开两个比较窗口，分别显示优化前后优化区域应力情况，如图 10-19 所示。

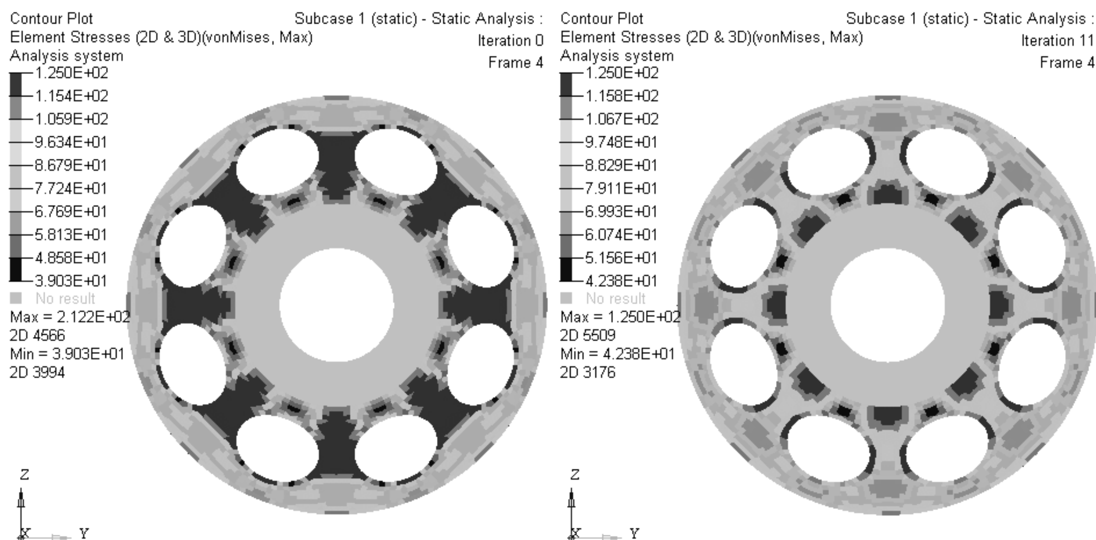


图 10-19 优化前后应力结果

STEP 08 模型中应用优化结果

优化结束后，可以通过 HyperMesh 直接将优化的结果应用到原来的有限元网格，方便进行后续分析。

（1）选择 Post 面板，并单击 apply result 按钮，如图 10-20 所示。

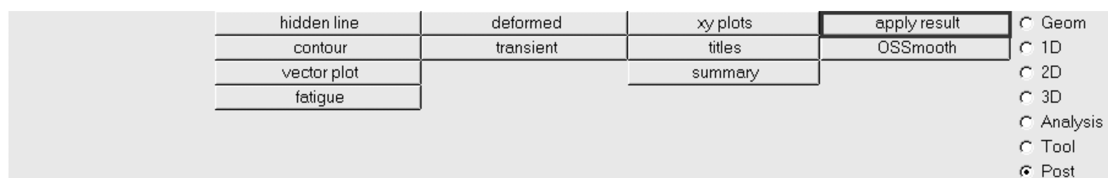


图 10-20 apply result 按钮位置

（2）单击 simulation =选择将应用的优化结果，单击 data type =选择 Shape Change，单击 nodes 选择 all，如图 10-21 所示。



图 10-21 选择最后一步迭代结果

（3）单击 apply 按钮，将优化结果应用到网格，如图 10-22 所示。

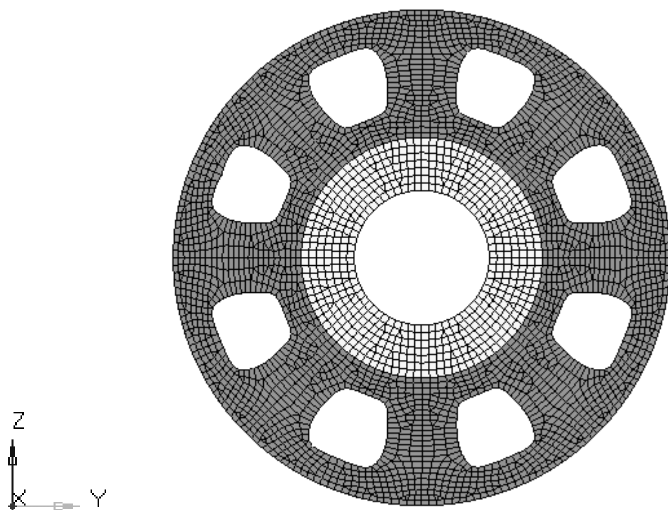


图 10-22　优化结果应用后的网格模型

（4）后续分析可以直接使用优化后的形状，提高建模效率。

10.2　实例：卫星盖板的形貌优化

本实例将介绍某卫星盖板（见图 10-23）随机响应的形貌优化。模型中已完成随机响应分析的设置，利用 RBE2 单元对平板进行约束，将两个频率变化的加速度作为激励施加到 RBE2 单元的独立节点上。优化目标是使得平板中心处沿 *X* 轴方向的最大加速度功率谱密度（PSD）最小化。

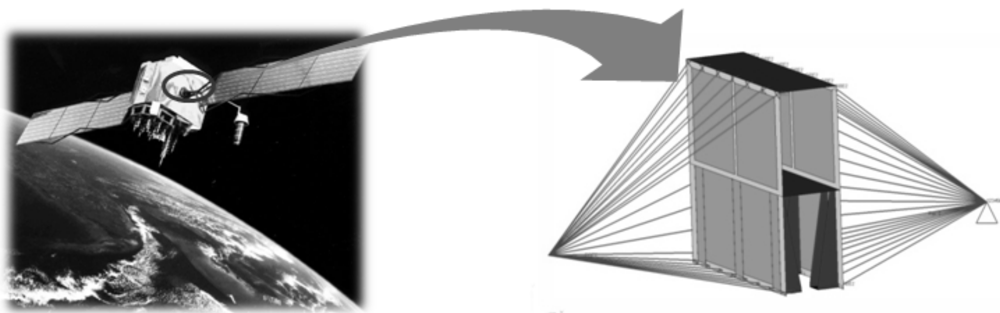


图 10-23　卫星盖板模型

本实例包括以下内容：

✓ 在 HyperMesh 中创建 PSD 响应下的形貌优化。

✓ 向 OptiStruct 提交计算。

✓ 利用 HyperView 和 HyperGraph 对结果进行后处理。

STEP 01 打开 HyperMesh，加载用户配置并打开文件

（1）启动 HyperMesh。在弹出的 User Profiles 对话框中选择 OptiStruct，然后单击 OK 按钮。可从工具条上的 Preferences 下拉菜单中找到 User Profiles。

这样就加载了用户配置。它包括与生成 OptiStruct 模型相对应的 HyperMesh 的功能面板、宏菜单和导入器。

（2）单击 Import Solver Deck 按钮，在 File type 处选择 OptiStruct。

（3）单击“打开文件”按钮。

（4）弹出 Select OptiStruct file 浏览窗口。

（5）在 <HyperWorks 安装目录>/tutorials/hwsolvers/optistruct/下选择文件 panel.fem。

（6）单击 Open 按钮，文件 panel.fem 的位置显示在 file 栏中。

（7）单击 Import。

STEP 02 创建形貌优化设计变量

在本实例中，设计空间由属性 PSHELL_5 的壳单元构成。肋参数定义为：最小宽度 0.4，高度 1，倾斜度 60°。定义分组模式 2-plane 作为对称肋设计的约束。

（1）单击 Analysis 中的 optimization。

（2）单击 topography，进入 Topography Optimization 面板。

（3）利用面板左侧的按钮，确认选中 create 子面板。

（4）单击 desvar =，输入 plate。

（5）单击高亮显示的 props。

（6）勾选 PSHELL_5 旁的复选框，单击 select。

（7）单击 create 创建形貌设计变量。

（8）利用面板左侧的按钮，确认选中 bead params 子面板。

（9）单击 desvar=，选择 plate，输入如图 10-24 所示的肋参数。

图 10-24 输入肋参数

（10）单击 update 按钮。

（11）利用面板左侧的按钮，确认选中 pattern grouping 子面板。

（12）单击 desvar=，选择 plate。

（13）单击 pattern type，从弹出的菜单中选择 2-plns sym。

（14）在 anchor node、first node 和 second node 处，分别单击切换器将 node id 改为 coordinates。

（15）输入如图 10-25 所示参数，用于定义 2-plane（两面）对称约束。

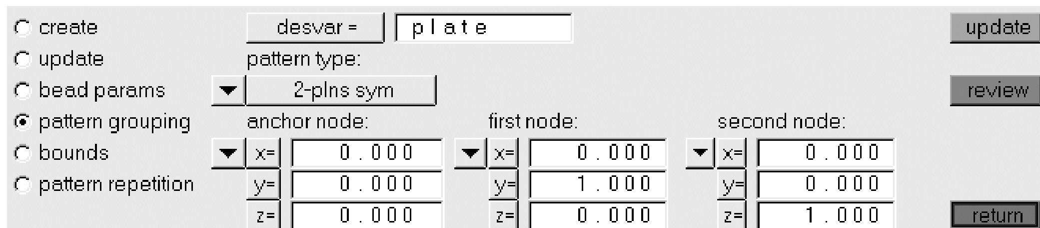


图 10-25　对称定义面板

（16）单击 update 按钮。

（17）利用面板左侧的按钮，确认选中 bounds 子面板。

（18）将 upper bound 设为 1.0，lower bound 设为-1.0。

（19）单击 update 按钮。

（20）单击 return 返回 optimization 面板。

STEP 03 创建设计响应

将平板中心处沿 *X* 轴方向的加速度功率谱密度（PSD）定义为用于随机响应优化的设计响应。

（1）进入 optimization 面板，单击 responses。

（2）在 response =处输入 psdaccl。

（3）选择 response type 下面的切换器，选择 psd acceleration。

（4）单击高亮的 nodes 栏。

（5）选择 by id，输入 67。节点 67 靠近平板中心。

（6）加速度功率谱密度沿 *X* 轴方向，故选择 dof1。

（7）单击 randps=，选择 RANDPS100，具体定义了用于随机响应分析的功率谱密度。

（8）将 frequency 设为 all freq。

（9）将 region 设为 no regionid。

（10）单击 create，然后单击 return 返回 optimization 面板。

STEP 04 创建目标

随机响应分析的目的是使得节点 67 的最大加速度 PSD 最小化。对于最小化最大的优化类型，首先定义 DOBJREF。

（1）在 optimization 面板，单击进入 obj reference。

（2）在 dobjref=处输入 psdacclref。
（3）单击 response=选择响应 psdaccl。
（4）勾选 neg reference=复选框，将值设为-1.0。
（5）勾选 pos reference=复选框，将值设为 1.0e6。
（6）通过正参考值和负参考值，将响应值 psdaccl 归一化。
（7）选择 all，将对象 DOBJREF 施加到所有工况。
（8）单击 create。
（9）单击 return，返回 optimization 面板。
（10）单击 objective。
（11）在面板左上角，切换到 minmax。
（12）单击高亮显示的 dobjrefs，选择 psdacclref。
（13）单击 create，然后再单击 return 返回 Analysis 页面。

STEP 05 启动 OptiStruct

（1）单击 Analysis 中的 OptiStruct。
（2）单击 input file 后的 save as 按钮。
（3）选择 OptiStruct 模型文件保存的目录，在 File name 处输入 panel_complete.fem。
（4）单击 Save 按钮。
注意到在 input file 栏出现 panel_complete.fem 文件的名字和位置。
（5）单击 memory options 切换到 memory default。
（6）单击 run options 切换到 optimization。
（7）单击 export options 切换到 all。
（8）单击 OptiStruct。

OptiStruct 求解器开始计算。如果计算成功，将在保存文件 panel_complete.fem 的目录下看到新的结果文件。

HyperView 用于查看通过形貌优化而做的新的肋设计。“XYPUNCH，ACCE，PSDF/67 (T1RM)”用于输出加速度的 PSD 到.pch 文件，然后在 HyperGraph 中查看源于输出的 PSD 图。输出到.peak 文件中的 RMS（有效值）和 peak（峰值）功率谱密度值可通过文本编辑器进行查看。

STEP 06 在 HyperView 中查看肋的样式

一旦看到在命令窗口中出现信息 Process completed successfully，就单击 HyperView。

（1）启动 HyperView，载入优化结果文件_des.h3d。出现的信息窗口提示成功载入 HyperView 的模型和结果文件。
（2）单击 Close 按钮，关闭信息窗口。
（3）单击工具条上的 Contour 按钮。

（4）在 result type 处选择 Shape Change (v) 。

（5）单击 按钮，选择最后一个迭代步。

（6）单击 Apply 按钮。

形状改变云图如图 10-26 所示。

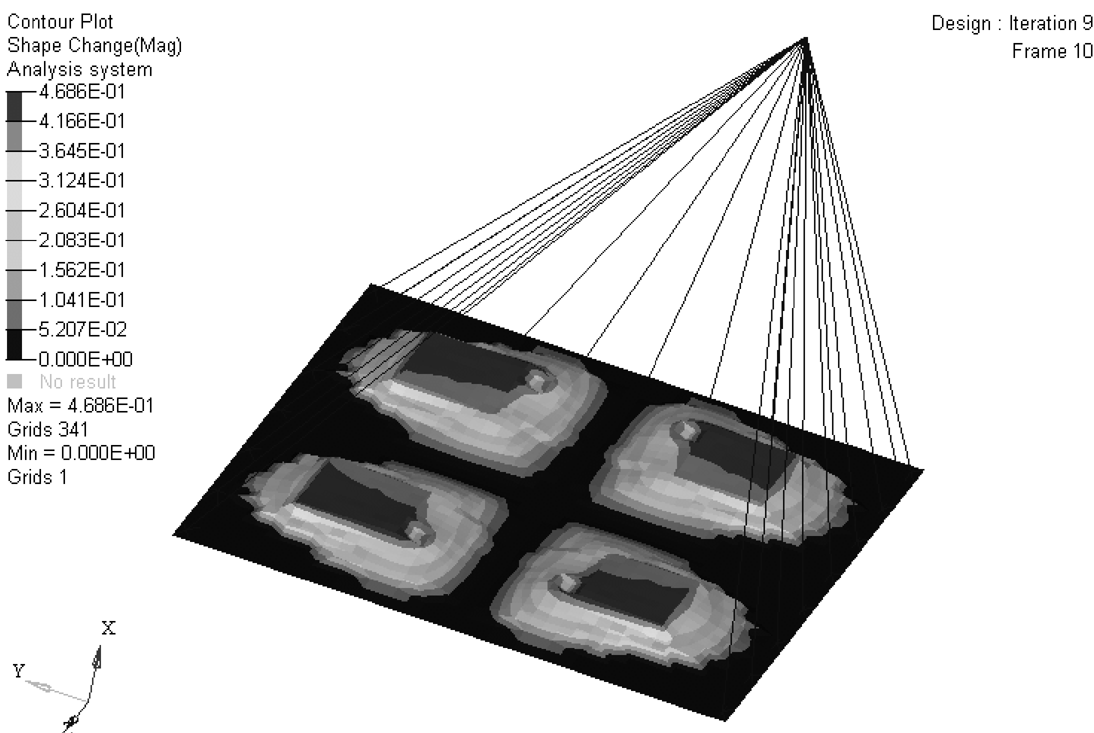


图 10-26　形貌优化结果云图

STEP 07 在 HyperGraph 中查看 PSD 结果

（1）启动 HyperGraph。

（2）单击 Build Plots 按钮。

（3）载入 panel_complete.pch 文件。

（4）将 X Type 设为 Frequency (Hz)。

（5）将 Y Type 设为 Group 1 Acceleration。

（6）高亮显示节点 67 和 X_Translation。

（7）单击 Apply。

（8）载入最初模型中节点 67 沿着 *X* 轴方向的 PSD。

（9）进入 Axes 面板，将加速度 PSD 的 *Y* 轴用对数坐标代替线性坐标。

（10）重复（6）和（7），选择最后一组加速度作为 Y Type。

（11）载入最后一步迭代中模型的节点 67 沿着 *X* 轴方向的 PSD，如图 10-27 所示。

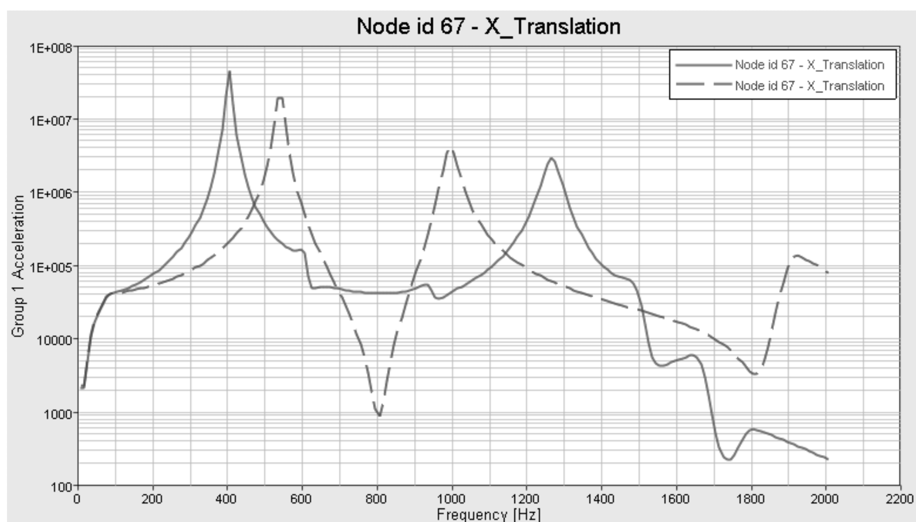


图 10-27　初始模型和优化后模型的加速度 PSD 值对比

10.3　小结

航天产品的工作环境比较复杂，优化设计中需要考虑的工况很多，本章通过两个实例：应力的自由形状优化和随机响应的形貌优化，说明了航天产品的优化潜力。前面章节介绍的各种结构优化技术，如复合材料优化技术、热载荷下的优化技术、运动机构的结构优化等都可以用在航天产品的设计中，从而提高结构性能和有效载荷。

第 11 章



HyperStudy 简介

Altair HyperStudy 是一个系统研究和优化工具，帮助工程师改进设计、进行“What If”研究、对试验数据进行相关性研究、优化复杂的多学科设计问题，以及评价设计的可靠性和鲁棒性等。

通过开放的接口系统，HyperStudy 允许用户在不同的模型上调用不同的求解器进行试验设计（DOE）、优化和随机性研究。所有主流的 CAE 求解器，如 RADIOSS、ABAQUS、Nastran、LS-Dyna、DesignLife 和 Fluent 等都可同 HyperStudy 集成进行优化。

HyperStudy 还能够与 PBSWorks 或其他计算资源管理系统相结合，帮助客户将仿真作业提交到所有可用的硬件资源上，最大化地利用硬件和软件资源。这一点提升了整体研究工作的效率。

本章重点知识

11.1 试验设计

11.2 近似模型

11.3 优化方法

11.4 Stochastic Study 随机性研究

11.5 小结

11.1 试验设计

试验是研究者在各个研究领域进行的，通常是要发现关于一个特定过程或系统的某些特性。一个设计的试验是一个或一系列试验。它对一个过程或系统的输入变量做一些有目的的改变，以便识别出引起输出响应变化的原因。

11.1.1 试验设计之目的

（1）确定哪些输入变量对输出响应影响最大。
（2）确定将有影响的可控输入变量设置在何值时。
（3）使输出响应接近于所希望的额定值。
（4）使输出响应的变化较小。
（5）使系统的不可控参量对输出响应的影响最小。
（6）用以构建近似模型来代替计算量非常大的实际模型进行求解。

11.1.2 HyperStudy 试验设计类型

表 11−1 给出了 HyperStudy 支持的试验设计类型及其适用场合。

表 11−1 试验设计类型及适用场合

试验设计类型	水　　平	特征及简评
全因子设计	任意	所需的设计点很多，在基于有限单元法的试验设计和多学科优化研究中，由于输入变量较多，很少采用全因子设计
部分因子设计	2 或 3	选取全因子设计的一部分，一个典型的部分因子设计常取全因子的 1/2、1/4 或 1/8
中心复合设计	5	用来构建二阶响应面，其主要特征包括每一因子 5 取值水平，已知目标响应为二阶，因子数量不超过 20 个
Box-Behnken设计	3	每个设计变量有 3 个取值水平，其中包括该设计变量的中值[（a+b）/2]。在构建二阶响应面时，该方法是一种较为经济的方法。可用在已知目标响应为二阶以及无需在设计区域边界上做预测的场合
Plackett-Burman	2	每一设计变量有两个取值水平，如设计变量为典型的 0-1 分布，或设计变量的取值为布尔值（与/非）。设计点可少至 N–1 个。该试验设计方法可用来对设计变量进行初次筛选，不适于进行模型近似分析
拉丁超立方采样	任意	试验次数与变量的个数无关。适用于响应面为高度非线性的情况
哈默斯雷采样	任意	适用于响应面为高度非线性的情况，在均匀性方面，它比拉丁超立方表现得更好；在基于有限单元法的试验设计方法中，它是目前最为有效的采样措施
用户自定义		重用用户自定义的试验设计表格。其中的数值对应变量的水平值
试验矩阵		重用用户自定义的试验矩阵。其中的数值对应变量的实际工程数值

11.1.3 全因子设计

全因子设计需考虑所有可能的因子组合及因子的每个取值水平，如图 11−1 所示。

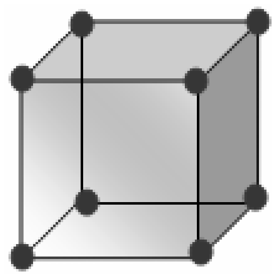


图 11−1　全因子设计

此类试验设计方法的长处在于能计算所有的主效应和交叉效应。但是由于计算规模限制，全因子设计当且仅当设计变量及其取值水平的数量都很少时方具有可行性。当因子数量及各因子水平较多时，需要大量的计算资源，故较少采用全因子设计。表 11−2 是一个典型的全因子设计的试验设计。

表 11−2　全因子设计矩阵

Run number	Factor name	A	B	C
	Factor levels	2	2	3
	Number of runs	$2^2 \times 3^1 = 12$		
1		1	1	1
2		1	1	2
3		1	1	3
4		1	2	1
5		1	2	2
6		1	2	3
7		2	1	1
8		2	1	2
9		2	1	3
10		2	2	1
11		2	2	2
12		2	2	3

全因子设计的最大问题在于运行效率。表 11−2 给出的试验设计方案需要进行 12 次运行。当设计变量及其取值水平上升时，总的需求量将急剧上升。例如，一个共有 8 个因子的试验设计方案，其中 5 个因子各有两个取值水平，两个因子各自各有 3 个取值水平，还有一个因子有 4 个取值水平。则所需要的试验次数如下：

因子总数　=　8

二水平因子个数　=　5

三水平因子个数　=　2

四水平因子个数　=　1

总设计数　=　$2^5 \times 3^2 \times 4^1$　=　1152

11.1.4 部分因子设计

随着因子数量的增加，2^k 因子设计中所需的试验次数呈指数增加。当设计因子数量很大时，全因子设计不具有可行性。部分因子设计是全因子设计的一个子集，可大大减少试验次数，如图 11−2 所示。

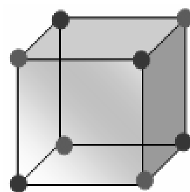


图 11−2　部分因子设计

一个两水平部分因子设计，通常表示符号为 2^{k-p} 其中，2 是每一因子的水平数，k 表示因子数，P 表示与全因子设计实验相比，部分因子设计实验次数是其 $1/2^p$。

进行部分因子设计的代价是主效应和交叉效应被混杂。在工程上，使用“分辨率”的概念描述这一混杂程度。分辨率用罗马数字 III、IV、V 等进行描述。其中：

- ✓ III——主效应与二阶交叉效应混杂。
- ✓ IV——二阶交叉效应之间混杂。
- ✓ V——二阶交叉效应与三阶交叉效应混杂。

一般部分因子设计会选择分辨率 IV 或更高的设计方案。

11.1.5 中心复合设计（CCD）

中心复合设计常用于已知模型的响应面为二阶的情况。针对一个有 k 个因子的模型，使用中心复合设计需要的试验次数服从以下关系式：

总运行次数=2^k 次的因子试验+$2k$ 次的轴向试验+n_c 次的中心实验

使用中心复合设计时，需要由用户定义两个参数：轴向距离 a 和中心点的个数 n_c。具体实例如图 11−3 所示。

Run#	X1	X2	X3
1	−1	−1	−1
2	−1	−1	1
3	−1	1	−1
4	−1	1	1
5	1	−1	−1
6	1	−1	1
7	1	1	−1
8	1	1	1
9	−α	0	0
10	+α	0	0
11	0	−α	0
12	0	+α	0
13	0	0	−α
14	0	0	+α
15	0	0	0

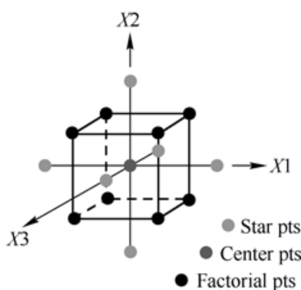


图 11−3　中心复合设计实例

k 的取值为 2，a 的取值为 α，中心点数量为 1，一共需要进行 15 次试验。根据以上参数得到试验设计方案，其中 Run 1～Run 8 为因子试验，Run 9～Run 14 为轴向试验，而 Run

15 为中心试验。

HyperStudy 支持不超过 20 个因子的实验。

11.1.6 Box-Behnken 设计

对比析因设计，Box-Behnken 设计可以在进行更少试验的基础上构建高阶响应面。该方法与中心复合设计方法有相似之处：保持对高阶响应面定义的基础上去掉部分试验。例如，针对一个有 3 个因子，每一因子有 3 个取值水平的试验设计来说，如果进行全因子试验设计，则需要进行 27 次试验。在使用中心复合设计时，对设计空间采样放弃了所有边上中点处的试验，即取某一变量 3 个取值水平中的最大值及最小值，以及轴向试验和中心点处的取值。因此，中心复合设计仅需进行 15 次试验，仍可构建出符合精度要求的二阶响应面。而 Box-Behnken 设计采用与中心复合设计相反的采样方式，即取 12 条边的中点以及 3 个中心点来拟合二阶响应面，如图 11−4 所示。中心复合设计与 Box-Behnken 设计的并集可以看成是一个完整的全因子设计，附加 3 次额外的在中心点处的试验。

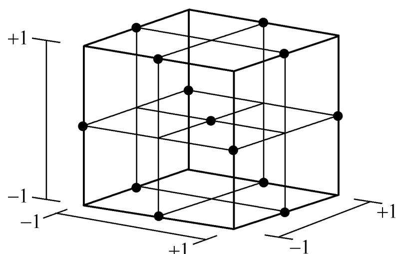


图 11−4　Box-Behnken 设计

Box-Behnken 设计在立方设计区域的边的中点及区域中心采样。因此它不能用于对角点有较高预测精度要求的情况。此外，当且仅当每一个因子的取值水平为 3 时，方可使用 Box-Behnken 设计。

11.1.7 Plackett-Burman 设计

Plackett-Burman 是饱和的部分因子设计，主要针对因子数较多，且未确定众因子相对于响应的影响显著程度而采用的筛选试验设计。Plackett-Burman 设计主要通过对每个因子取两水平来进行分析，通过比较各个因子两水平的差异与整体的差异来确定因子的显著性。筛选试验设计不能区分主效应与交互作用的影响，但对显著影响的因子可以分辨出来，从而达到筛选的目的，避免在后期的优化试验中由于因子数太多或部分因子不显著而浪费试验资源。

在 HyperStury 中，当且仅当每一因子只有两取值水平时，方可使用 Plackett-Burman 设计。

11.1.8 拉丁超立方采样

在进行拉丁超立方试验设计时，首先将整个设计区域分为若干个等概率子区间，然后进行 r^n 随机采样。其中，r 为试验次数，n 为因子数，如图 11−5 所示。

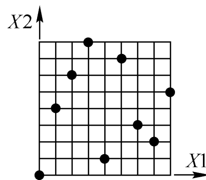


图 11−5　拉丁超立方设计

可将拉丁超立方设计看成是分层的蒙特卡洛方法。该方法能将成对相关系数控制在一个非常小的值（这对于无关参数估计来说非常重要）或某一用户指定的值。当需要对设计空间的内部进行探索，以及试验次数为定值（用户自定义）时，拉丁超立方是非常有用的。在进行拉丁超

立方采样时，HyperStudy 将成对相关系数尽量控制到接近于零。

11.1.9 哈默斯雷采样

哈默斯雷采样属于类蒙特卡洛方法。基于哈默斯雷点，该算法采用伪随机数值发生器，均匀地在一个超立方体中进行抽样。哈默斯雷采样的优点在于可用较少的样本提供对输出统计结果的可靠估计。同时，它能在 K 维超立方体上取得很好的均匀分布。这是哈默斯雷采样优于拉丁超立方采样的特性：拉丁超方采样只能在一维问题上有好的均匀性。图 11-6 所示为 100 个采样点在拉丁超立方（左）与哈默斯雷采样（右）中的分布比较。

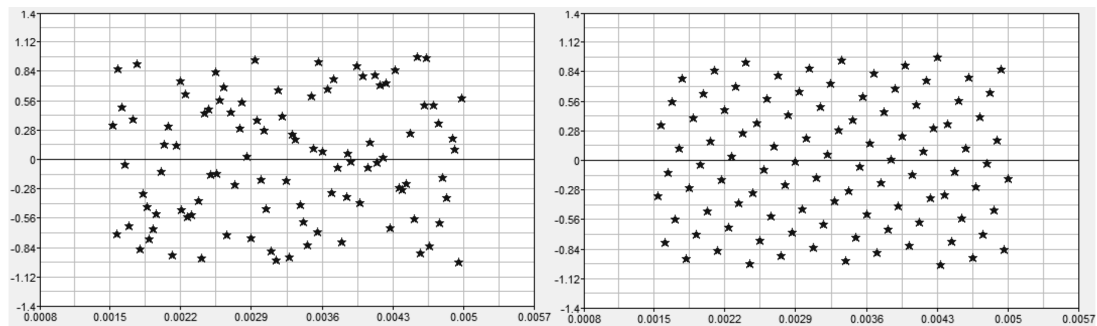


图 11-6　拉丁超立方（左）与哈默斯雷（右）

11.1.10 用户自定义设计（User Define）

用户自定义设计允许使用自己的设计方案进行参数研究。HyperStudy 将用户自定义试验设计方案读入，并使用与其他试验设计方法相同的形式进行调用。该方法的最大优势在于可以结合特殊的工程需求来构建不同的试验设计方案。在使用用户自定义设计时，用户必须在矩阵的第一列给出本次设计的试验次数（行数）及因子数（列数）。表 11-3 给出了一个典型的用户自定义设计方案。

表 11-3　用户自定义设计

9	3	
1	1	1
1	2	2
1	3	3
2	1	3
2	2	2
2	3	1
3	1	2
3	2	3
3	3	1

11.1.11 设计矩阵（Run Matrix）

当使用设计矩阵方法时，用户可以使用自己的设计矩阵进行参数研究。该试验矩阵可由 HyperStudy 读入并调用。该方法的最大优势在于可以结合特殊的工程需求来构建不同的试验设计方案。该矩阵不用与任何已有的试验设计方法及其需求相兼容。它可对参数研究进行自动化处理。空格、制表符或逗号可用来分隔矩阵的元素。不同的行代表不同的试验设计方案，而不同的列则代表不同的设计因子。表 11−4 给出了一个典型的试验矩阵。

表 11−4　试验矩阵

1.0	2.0	3.0	4.0
4.1	4.3	4.5	4.6
6.7	8.1	10.0	11.0
17.2	1.0	1.0	3.0
02	0.4	0.5	1.7
3.4	2.1	7.3	9.1

在实际应用的过程中，并不要求变量个数与列数严格对应。用户可以通过单击 **Controlled Allocations** 按钮将设计变量在矩阵中进行分配。

此外，试验矩阵不会强制用户使用所有的试验。用户可以通过单击 **Write/Execute runs** 按钮关闭那些暂时不需要被调用的试验。

11.1.12 试验设计后处理

HyperStudy 向用户提供了一整套功能完备的分析模块，用于对试验设计数据进行后处理：

- ✓ 主效应。
- ✓ 可控因子交互作用。
- ✓ 不可控因子交互作用。
- ✓ 可控—不可控因子交互作用。
- ✓ 敏感指数分析。

本节将分别就以上内容进行简要介绍。

- ➢ 主效应。通过主效应分析，用户可以清晰直观地查看可控因子与响应之间的关系，并考查当该可控因子位于不同取值水平时对该响应的影响程度，如图 11−7 所示。不同颜色的折线对应不同的因子，可以清楚地看到某个因子取不同水平时对应的响应数值（该值为其他所有因子不同组合下的响应值的数学平均），并且折线斜率越大，代表该因子对响应影响越大。
- ➢ 交互作用。交互作用可用来评价某一因子在其他因子的取值水平发生改变时，对响应是否可以保持同等效应的能力。两因子之间的交互作用可以为正，也可以为负。如果两条折线之间平行，表示这两个因子之间没有交互作用，否则具有交互作用。

如图 11–8 所示，3 条折线不平行，表明这 3 个因子的取值对于该响应值具有相互影响作用。

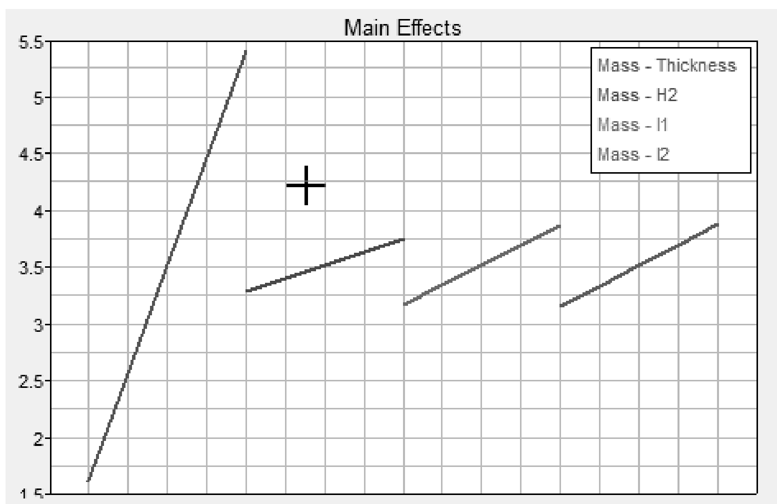


图 11–7　主效应

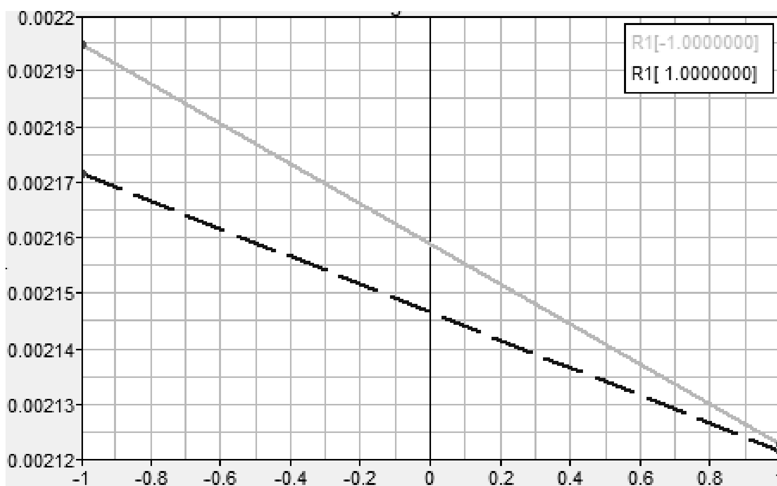


图 11–8　交互作用

- 可控因子交互作用。用以描述可控因子之间的交互作用。
- 不可控因子交互作用。用以描述不可控因子之间的交互作用。
- 可控—不可控因子交互作用。用以描述可控因子与不可控因子之间的交互作用。
- 敏感度指数。正如主效应可以评价可控因子对响应的影响程度一样，敏感度指数用以评价不可控因子对响应的影响程度。

11.2　近似模型

复杂的科学和工程问题的计算成本是十分惊人的。在大规模数值计算领域，软、硬件的

投资，人力成本，资源耗费等环节伴随着计算规模的增大会有急剧的增长。在设计研究领域，构建高度保真的模型往往意味着大量人力物力成本的投入。很多情况下，这种高投入的数值模拟不是必需的。作为替代手段，现代工程多采用低成本的代理模型进行分析，而偶尔使用高度保真模型。研究人员往往在产品设计的早期使用此类低成本代理模型取代高度保真模型进行大量的探索性试验。模型近似技术就是在平衡求解效率和模型精度的研究过程中发展起来的。

一旦建立起某个响应的近似模型，就可以用这个近似模型来对该响应进行分析。用户可以将在初始设计中未考虑的新的参数组合插值到近似模型中，这样能很快得出对响应的估计，而不需要对高保真模型进行分析。

此外，模型近似技术也可以被用做优化研究。对比基于高保真模型的优化工作，模型近似技术可大大减少对计算资源的占用，但所求解出的最优参数可能与高保真模型有较大差别。可以将基于近似模型的最优解作为初始设计点，进行基于高保真模型的优化求解，这样可减少优化迭代次数和节省计算资源。

最小二乘法（LSR）、人工神经网络（ANN）、Kriging 以及 MARS 等技术都可以用来构建近似模型。Altair HyperStudy 向用户提供了最小二乘法（LSR）、移动最小二乘法（MLSM）和 HyperKriging 3 种模型近似方法。

11.2.1 最小二乘法（LSR）

一个通过最小二乘法构建的典型二阶近似模型可以表示如下：

$$f(x) = \boldsymbol{\beta}_0 + \sum \boldsymbol{\beta}_i x_i + \sum \boldsymbol{\beta}_{ij} x_i x_j$$

HyperStudy 允许用户在使用最小二乘法进行拟合时，构建任意阶数的多项式。一个 p 阶的近似可用矩阵表示如下：

$$\boldsymbol{f}=A\beta$$

在 n 个样本点处的响应向量可以表示为

$$\boldsymbol{y}=A\beta+\boldsymbol{\varepsilon}$$

一般来说，$\boldsymbol{y}$ 是一个（n×1）形式的，由试验设计（DOE）得到的输出响应向量；$\boldsymbol{A}$ 是一个由 DOE 输入值构建的（n×p）矩阵；$\boldsymbol{\beta}$为一个（p×1）的回归系数向量；$\boldsymbol{\varepsilon}$为一个（n×1）的随机误差向量。对β的最小二乘估计是通过对响应面 $\boldsymbol{f}$ 与模型输出响应 $\boldsymbol{y}$ 之间的加权最小二乘拟合得到的。

$$(\boldsymbol{y}-\boldsymbol{f})'\ W(\boldsymbol{y}-\boldsymbol{f}) \Rightarrow \min$$

该问题等价于求解正则方程：

$$\boldsymbol{\beta} = (A'\ WA)^{-1} A' W y$$

其中，$\boldsymbol{W}$ 为一个（n×n）的加权系数对角阵，权系数代表了各个采样点的重要程度。在通常的最小二乘法问题中，加权系数矩阵是一个对角单位矩阵，则上式可以简化为

$$\boldsymbol{\beta}= (A'\ A)^{-1} A' \boldsymbol{y}$$

11.2.2 移动最小二乘法（MLSM）

移动最小二乘法是对传统的加权最小二乘技术的推广。移动最小二乘法与最小二乘法的最大区别在于其在 DOE 各个采样点处的加权系数不是一成不变的，而是从样本点到取值点距离的函数。

在传统的最小二乘法中，有：

$$\boldsymbol{\beta}=(A'WA)^{-1}A'W\boldsymbol{y}$$

式中，$\boldsymbol{A}$ 为由 DOE 输入值构建的（n×p）矩阵；$\boldsymbol{\beta}$ 为回归系数向量（p×1）；$\boldsymbol{W}$ 是一个 n 阶对角阵，其主元素为加权系数，各个主元素值的大小表征了各个采样点的重要程度。

在移动最小二乘拟合中，HyperStudy 向用户提供了一阶、二阶和三阶的拟合方式。在移动最小二乘法中引入了紧支（Compact Support）的概念。即认为在各个 DOE 采样点 x_i 处的取值 y 仅受 x_i 附近子域内的样本点影响，这个子域称为该点的影响区域，影响区域外的样本点对 x_i 处的取值 y 没有影响。在子域定义一个权函数 w（x），如果权函数在整个区域取常数，就是传统的最小二乘法。

与特定采样点相关联的加权值会随着取值点的远离而衰减。由于权函数是围绕取值点 x 定义的且其幅值随着 x 的移动而改变，因此把由最小二乘拟合生成的近似函数称为移动最小二乘拟合。由于权值 w_i 是 $\boldsymbol{x}$ 的函数，因此最终拟合得到的多项式系数β也与 $\boldsymbol{x}$ 相关。这就意味着使用移动最小二乘法进行拟合时，最终无法获得近似函数的解析形式。但是从整体看，其计算花费仍然较低。

HyperStury 向用户提供了通过控制加权函数中的参数 r 以控制最终拟合结果逼近程度的功能。在加权函数 w_i（r）中，参数 r 为权值衰减率，其定义方式为以采样点 x_i 为球心的球的半径。加权函数在超出了 r 的范围后（即球体表面外侧），其权值趋近于 0。

HyperStudy 提供了几种权值衰减函数，如高斯函数和多项式等。

1．高斯函数（推荐）

$$w_i=\exp(-\theta r_i^2)$$

式中，r_i 为第 i 个采样点与当前点之间的正则距离；参数θ表征了拟合结果的逼近程度。当θ=0 时，即为传统的最小二乘法拟合。参数θ取值越大，则拟合结果将越逼近各个采样点。图 11−9～图 11−11 给出了当采样点处于 r=0 时，θ值在区间[0，1]变化对加权函数的影响。

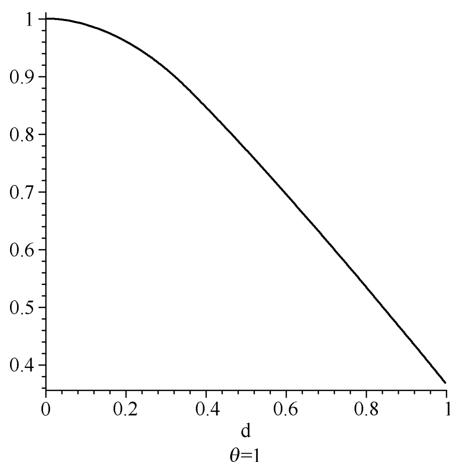


图 11−9　r=0，θ=1 时的高斯函数

2．三阶多项式

其中$\rho_i = r_i / R_{max}$。正则影响半径 R_{max} 与拟合逼近度成反比。其取值越小，则拟合逼近度越高。三阶多项式拟合曲线如图 11−12 所示。

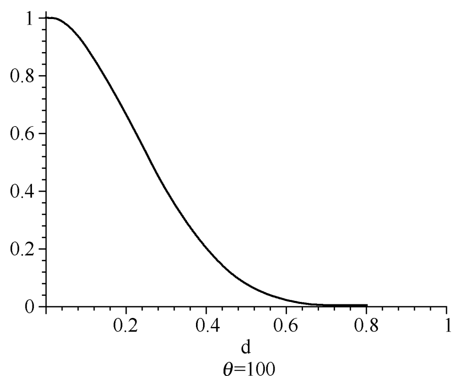


图 11-10　r=0，θ=10 时的高斯函数

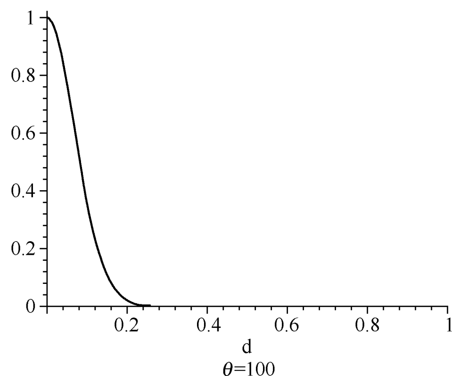


图 11-11　r=0，θ=100 时的高斯函数

3．四阶多项式

四阶多项式拟合曲线如图 11-13 所示。

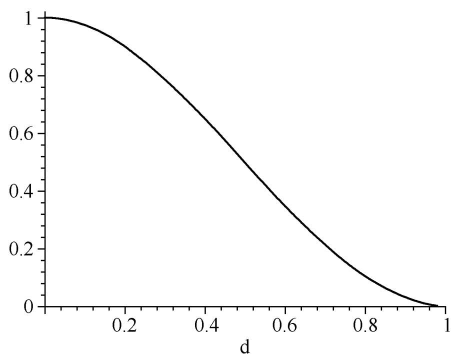


图 11-12　三阶多项式拟合曲线

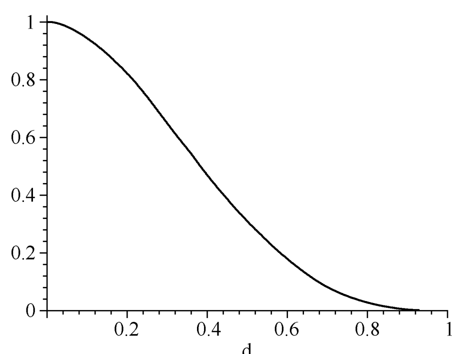


图 11-13　四阶多项式拟合曲线

4．五阶多项式

五阶多项式拟合曲线如图 11-14 所示。

5．七阶多项式

七阶多项式拟合曲线如图 11-15 所示。

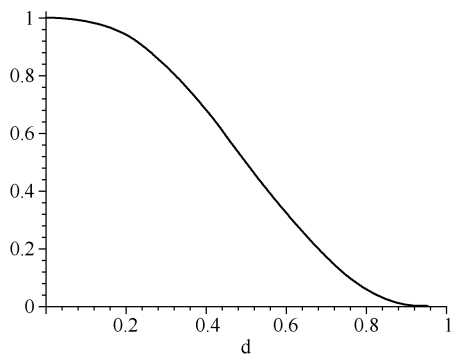


图 11-14　五阶多项式拟合曲线

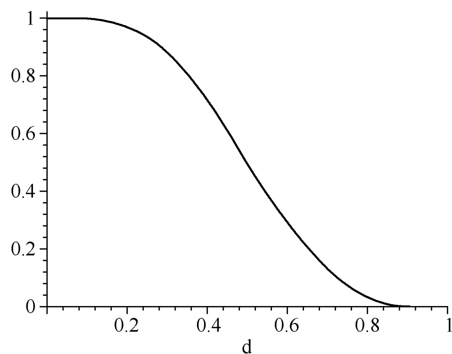


图 11-15　七阶多项式拟合曲线

下面以六峰驼背函数为例来说明移动最小二乘法的拟合质量。采用 100 个哈默斯利样本点，并使用高斯加权函数（θ=120），拟合结果如图 11−16 所示。左图为原函数，右图为使用移动最小二乘法的拟合结果。

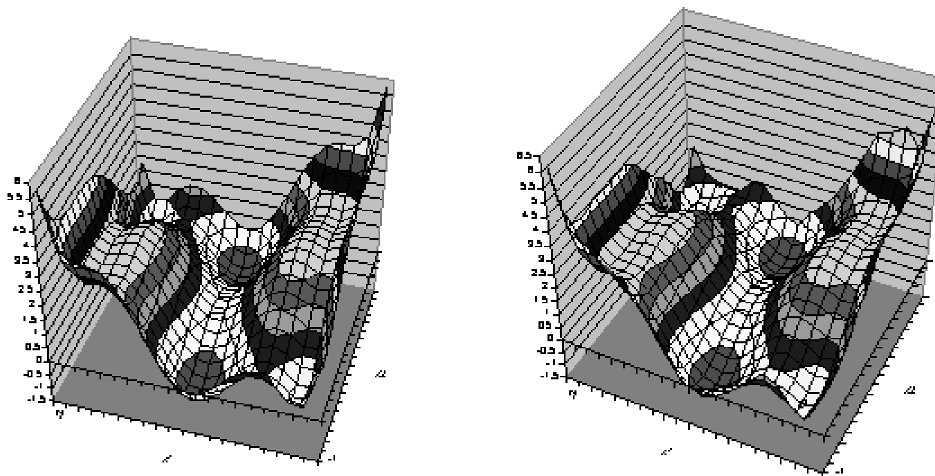


图 11−16　六峰驼背函数

为了帮助用户更加快捷方便地对 Closeness of fit 参数进行定义，HyperStudy 将以上各类加权函数的参数统一缩放至[0，10]的取值范围。当参数取 0 时，意味着较低的逼近程度（等效于传统的最小二乘拟合）；当参数取 10 时，则为高度逼近。该参数可以由用户自行定义，或者由 HyperStudy 自动确定以最终获得最佳的模型近似结果。如果选择了由 HyperStudy 自动确定，用户需要提供第二个试验设计以供模型校正（Validation Matrix）。模型校正采用以下 3 种准则：决定系数（R^2），平均相对误差绝对值（Relative Average Absolute Error）或最大绝对误差（Maximum Absolute Error）。根据指定的准则，HyperStudy 通过优化迭代将该准则变动范围减少至指定值（δ,高级控制参数）来获得最佳的 Closeness of fit 参数值。得到 Closeness of fit 参数值的最优值后，将用于构造近似模型的第一次试验设计和用于校正模型的校正试验设计进行合并后对近似模型重构以获得更好的拟合质量。

如果 Closeness of fit 参数是由用户指定的，那么会存在潜在的风险：影响域所包含的样本点不足以完成正确的最小二乘法拟合。为了避免这一情况，HyperStudy 会检测影响域是否包含至少 $K+N_{\text{excess}}$ 个点。其中，K 为基础多项式（线性，二阶或三阶）系数的个数，N_{excess} 为预定义的额外点的个数（高级控制参数）以确保足够的冗余信息来构建最小二乘拟合模型。那些权值小于指定阈值 $W_{\min}$（最小权值，高级控制参数）的样本点被排除在影响域之外。

为了避免在最小二乘拟合时求解线性方程组的病态系统，HyperStudy 将在求解过程中对分解矩阵主元素值进行监控，一旦主元素值小于用户预定义阈值ε（高级控制参数），则马上终止求解，并提示出错信息。此类错误主要是由于输入数据的错误导致的。

图 11−17 给出了控制参数的默认值，并按照基本控制参数和高级控制参数进行分类。基本控制参数的默认取值如下：基础多项式为二阶，权函数为高斯函数，由 HyperStudy 自动确定 Closeness of fit 参数，使用 R^2 作为模型近似质量的考查准则。此外，如果选择了用户指

定 Closeness of fit 参数，默认值为 5.0。高级控制参数的默认值为 N_{excess}=3，W_{min}=0.001，ε=1.0e−12，δ=0.001。

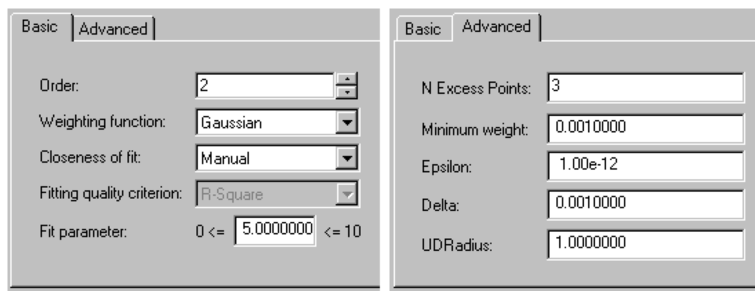


图 11−17　控制参数及其默认值

11.2.3 HyperKriging

Kriging 是统计学的主要内容之一。从统计学意义来说，Kriging 是从变量相关性和变异性出发，在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法。从插值角度讲，是对空间分布的数据求线性最优，无偏内插估计的一种方法。Kriging 的适用条件是区域化变量存在空间相关性。

HyperKriging 方法为基于 Kriging 方法的 HyperStudy 近似模型构建方法。和其他近似技术一样，Kriging 使用 DOE 模型采样点处的响应值来构建近似模型。Kriging 方法最早被应用于地质领域。Kriging 也被称为计算机实验的设计与分析（DACE），以强调它是用来对确定性的计算机模拟进行建模的。基于 Kriging 方法构建的近似模型，其曲线经过原有模型在 DOE 采样点处的响应值，也就是说它产生了一个插值模型。因此 Kriging 方法适于对不含噪声的高度非线性响应数据进行建模。Kriging 等效于径向基函数插值或薄板样条。

图 11−18 比较了 Kriging 和二阶多项式模型对只有一个变量的响应进行拟合的曲线。可以观察到，最小二乘拟合对数据进行了平滑处理，而 Kriging 模型经过采样点处的响应值。

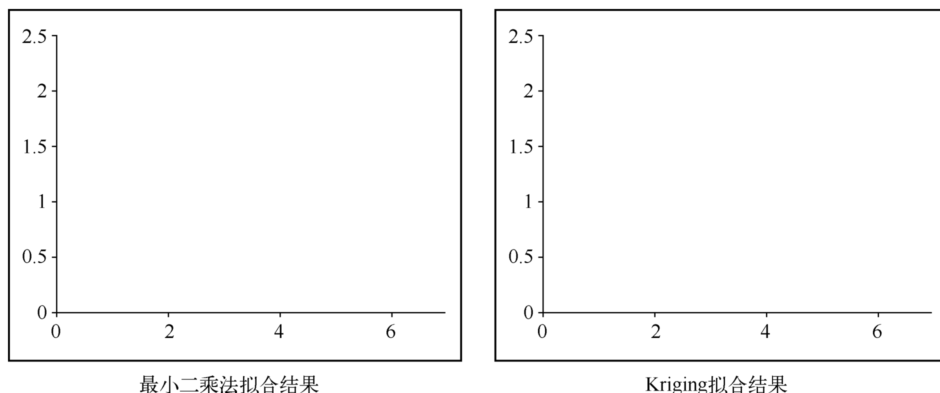


图 11−18　Kriging 拟合结果比较

模型校正样本点（Validation Matrix）的使用不会改变近似模型，而是增加了对拟合质量

的评价。近似模型经过所有的初始样本点，但有可能不会经过校正样本点。

11.2.4 数据统计分析

对模型近似的结果，HyperStudy 向用户提供了以下几种分析方法：

- ✓ 方差分析。
- ✓ 残差分析。
- ✓ 模型诊断。

以下将分别针对这几种方法进行简要介绍。

1．方差分析（ANOVA）

通过方差分析，用户可以对误差变化进行估计，并考查各个因素对系统的影响程度。HyperStudy 提供了对最小二乘法的方差分析。表 11–5 给出了与方差分析相关的一些数据。

表 11–5 方差分析相关参数

DoF	自由度
SS	平方和
MSS	平方和均值（MSS=SS/DoF）
%	百分比贡献
F0	F0 值（F0=MS（Variable）/MSS（Error））

2．残差分析

残差为由求解器提取的响应值和由近似模型提取的响应值之间的差异。图 11–19 所示残差图可以用来衡量基本假设与实际模型之间的差异。

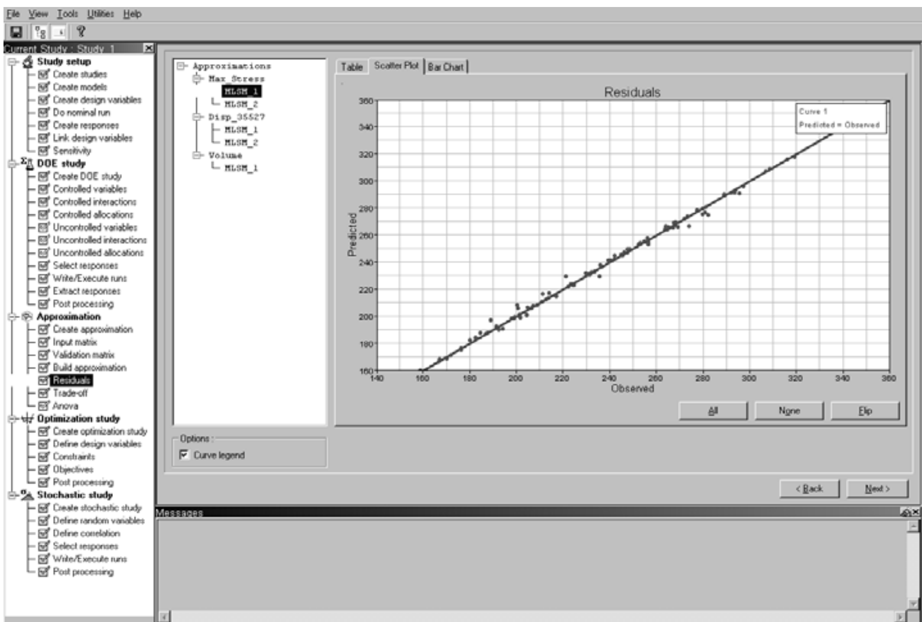


图 11–19 残差分析

3．模型诊断

HyperStudy 向用户提供了模型诊断功能，用以评价近似模型的精确程度。模型诊断功能包含表 11-6 所示的信息。

表 11-6　模型诊断信息

R^2	决定系数 R^2 的值是对不同模型分析所得数据的变化分量
R^2- adjusted	模型中的附加项总是增加 R^2 的值，这导致对分析数据的错误理解，这就是为什么有时会采用校正的决定系数 R^2- adjusted 的原因。当 R^2 与 R^2- adjusted 相差很大时，说明在模型中可能包含非显著项
置信区间	每个回归系数的置信阈值

4．T-Value

T 值是用来衡量多项式近似质量的指标。T 值按照下式进行计算：

$$t_j = \frac{\beta_j}{\sqrt{\sigma^2 C_{jj}}}$$

式中，β_j 为对应的回归系数；C_{jj} 为矩阵$(X^{\mathrm{T}}X)^{-1}$ 的对角元素；σ^2 按照下式进行计算：

$$\sigma^2 = \frac{SS_E}{n-p}$$

其中，SS_E 为估计值与真实值间的均方误差之和，n 为样本数，p 为回归的项数。

T 值的符号与回归系数的符号是一致的。当误差为 0 时，T 值的取值趋于无穷大。当 $|t_0|>t_{\mathrm{critical}}$ 时（其中 $t_{\mathrm{critical}}=t(\alpha/2,n-p-1)$），说明该回归系数对于模型来说非常重要。$t_{\mathrm{critical}}$ 服从参数为 $\alpha/2$ 和 $n-p-1$ 的 T-分布。T 值越大，意味着该系数对精确近似越重要。

11.3　优化方法

一个优化问题通常由以下要素组成。

- 目标函数：工程师通过目标函数 $f(x)$ 实现对系统响应的最大化、最小化，或使响应逼近一个目标值。例如在结构设计中，目标函数可能是将某个特定区域的应力最小化。
- 设计变量：设计变量 $\boldsymbol{x}$ 是一组可能影响目标函数的变量。
- 约束函数：约束函数 $g(x)$ 定义了系统响应的取值范围，使设计符合既定要求。

典型的优化问题的定义包括以下几个方面：

1．最小化问题

$$\begin{aligned} &\min\ f(x) = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) \\ &\text{s.t.}\quad g_j(x) \leqslant 0 \qquad (j = 1, \cdots, m) \\ &\qquad x_i^L \leqslant x_i \leqslant x_i^u \qquad (i = 1, \cdots, n) \end{aligned}$$

2．最小-最大问题

最小-最大问题（将响应的最大值最小化）的目标函数，记作：

$$\min \left\lfloor \max(f_1(x)/f_1, f_2(x)/f_2, \cdots, f_K(x)/f_K) \right\rfloor$$
$$\text{s.t.}\quad g_j(x) \leqslant 0 \qquad (j=1,\cdots,m)$$
$$x_i^L \leqslant x_i \leqslant x_i^u \qquad (i=1,\cdots,n)$$

HyperStudy 通过自动增加一个变量 β，将最小−最大问题转换成一个普通的优化问题：

$$\min \beta$$
$$\text{s.t.}\quad f_j/\overline{f}_j(x) \leqslant \beta \qquad (j=1,\cdots,k)$$
$$g_i(x) \leqslant 0 \qquad (i=1,\cdots,n)$$

3．系统辨识

还可以用 HyperStudy 定义系统辨识问题。系统辨识是通过修改设计变量，将一组响应值与目标值拟合的一种方法，属于优化的范畴。其目标函数用最小二乘法表达式记作：

$$\min \sum \left(\frac{f_i - \tilde{f}_i}{\tilde{f}_i} \right)^2$$

11.3.1 自适应响应应面法（ARSM）

在自适应响应应面法中，目标函数和约束函数按照以下二阶多项式进行拟合：

$$g_l(x) \approx \hat{g}_j(x) = a_{jo} + \sum_l^n a_n X_l + \sum_l^n \sum_l^n a_m X_l X_k \qquad (j=1,\cdots,m+1)$$

式中，m 为约束的个数；n 为设计变量的个数；a_{j0}、a_n、a_m 为二次多项式系数。

二次多项式的系数则是由此前的设计点通过最小二乘拟合得到的，其拟合过程原理如图 11−20 所示。

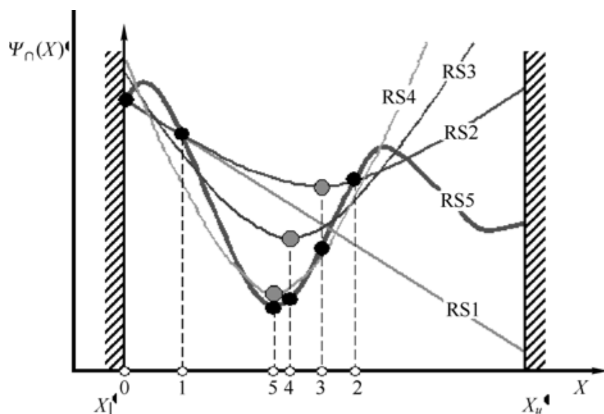


图 11−20　自适应响应应面法拟合过程

自适应响应应面的工作流程如下：

（1）分析初始的设计点以及由扰动设计变量生成的 n 个新的设计点（共计 n+1 个设计点）。

（2）使用最小二乘法确定目标函数和各约束函数的多项式系数。

- 如果已求解的设计点数为 n+1，确定常数项和一次项系数 a_{j0},a_{ji}，建立线性响应面 RS1。
- 每产生 n 个设计点，可增加二次项系数 a_{jw}。
- 如果已求解的设计点数超过 1+n+（n+1）×n/2，则对设计点进行加权来确定系数 a_{jw} 以给出二阶响应面 RS2，RS3，RS4,…

（3）用数学规划法对基于响应面的问题进行优化求解。自动选取最优化方法。

（4）对模型近似最优点进行分析。

（5）如果优化迭代已收敛（图中的 RS5），则停止求解。收敛准则包括以下内容：

- 绝对收敛。
- 相对收敛。
- 设计变量收敛。
- 软收敛。

（6）如果设计不收敛，则返回步骤（2）（在每个迭代步对二阶响应面进行评估以减少近似模型与实际响应之间的误差）。

通常情况下，设计点数总是比完成最小二乘拟合所需要的更多，从而导致系统超定。ARSM 使用了高效的算法对响应面进行拟合以更接近某些感兴趣的设计点。同时，ARSM 引入了移动限制以确保算法的鲁棒性。

除了在以上方案中采用的二阶响应面，ARSM 优化器还包含了另一可选方案——可扩展响应面法（SRSM）来构建响应面。在 SRSM 中，响应面的构建只依赖于重要的设计变量（对响应的贡献比较大）。这使 ARSM 能处理大规模（大量的设计变量）的优化问题。同时也消除了至少 n+2 次迭代的限制。

在 HyperStudy11.0 版本中，ARSM 提供了新的核心优化引擎。以前 ARSM 主要采用 SQP 作为核心优化引擎。现在可以选择混合核心优化引擎（GA+SQP）来改善 ARSM 的性能。混合核心优化引擎可消除对离散设计变量的数量和取值水平的限制。对离散变量的优化设计，ARSM 使用全因子方法，设计变量的总数及设计变量取值水平的总数受到 32 位操作系统软件寻址空间的限制。全因子设计总量必须小于 $2^{31}-1=2147483647$。

对于可能出现的错误求解，HyperStudy 提供了两种解决方法：忽略出错运行步（Ignored failed analysis）或终止运行（Terminate optimization）。如果忽略出错运行步，那么 HyperStudy 将设计变量从当前出错的运行恢复到上一迭代步时的状态，并使用出错时步长的 1/2 重新进行计算。如果选择出错时终止计算，那么 HyperStudy 将向用户返回错误代码 255。

11.3.2 可行方向法（MFD）

可行方向法是最早出现的用以求解约束优化问题的算法之一。该方法的基本思想是从当前的可行设计点移至更优的可行设计点。目标函数在新的设计点中取值更优，且满足所有约束条件。

为了确定搜索方向 s，在可行方向法中需要求解以下问题：

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} + as$$

目标函数需要满足：

$$S^{\mathrm{T}}\nabla_x f < 0$$

且搜索必须在可行域中进行：

$$S^{\mathrm{T}}\nabla_x g_i \leqslant 0$$

一旦搜索方向 s 确定了，则沿该方向进行一维搜索以确定步长。

可行方向法包含解耦的两个子问题：

- ✓ 搜索方向的确定。
- ✓ 步长的确定。

11.3.3 序列二次规划（SQP）

序列二次规划是一种用于求解有约束问题的经典优化方法。其基本思想是在原有模型的基础上构建一个拉格朗日二阶近似模型，并通过求解该近似模型以确定搜索方向：

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} + as$$

在搜索过程中，设计约束被线性化，得：

$$\min \tilde{f}(s) = f(x^{(k)}) + \nabla_X^{\mathrm{T}} fs + \frac{1}{2} \mathrm{s}^{\mathrm{T}} \mathrm{C}_{(k)} s$$

$$\tilde{\mathrm{g}}_i(s) = g_i(x^{(k)}) + \nabla_X^{\mathrm{T}} g_j s \leqslant 0$$

求解此类二次问题的数值方法有很多。搜索方向的确定服从以下基本原则：从当前设计点出发，通过搜索得到的新的设计点需要使目标函数的取值更优，且满足约束条件。

在 HyperStudy 中，序列二次规划的工作流程如下：

（1）初始化，设置 C=1。

（2）计算所有导数。

（3）求解二次规划子问题。

（4）计算拉格朗日乘子。

（5）使用外点罚函数法进行搜索。

（6）检查收敛性。

11.3.4 遗传算法（GA）

遗传算法是以进化理论为依托的一类机器学习技术。与传统优化方法不同，遗传算法是一种群体进化技术。个体通常用二进制来进行编码。在进行适应度（Fitness）计算时，需对个体进行解码。适应度是评价某个解优劣性的指标。按照达尔文的适者生存的进化理论，具有高适应度的个体更有可能被选择（Selection）来繁殖一下代。

基于所选个体，通过遗传操作算子将繁殖（Reproduction）下一代。一个个体将与所选的另一个个体按照一定概率进行交叉（Cross over）和变异（Mutation）。所产生的个体成为下一代的候选解。这一过程将被重复许多代以使种群不断进化，从而获得优化问题的解，

如图 11−21 所示。

HyperStudy 的遗传算法具有以下特点：

- 将种群中的一小部分精英直接保存至下一代。
- 根据所定义的优化问题自动确定种群大小。当然，用户也能手动修改。
- 提供 3 类交叉操作：单点交叉，两点交叉和均匀交叉。单点交叉时，在随机选中的位置将两个父体分开，并交换两个父体的子代码以产生子体。例如，如果父体 1 表示为[Head1, Tail1]，父体 2 表示为[Head2, Tail2]，则所产生的子体为[Head1, Tail2]和[Head2, Tail1]。类似的，两点交叉时，随机选取两点对父体进行分割，从而产生 3 段子代码用来交叉以产生子体。均匀交叉则通过复制对应父体的个位来产生子体。父体及个位的选择是随机等概率进行的，如图 11−22 所示。

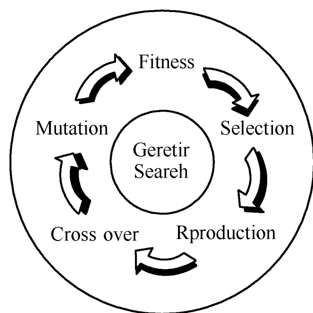


图 11−21　遗传算法

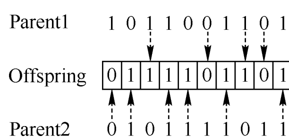


图 11−22　均匀交叉

- 采用指定子种群大小（通常取 2）的联赛选择：从随机选取的子种群中选出最优个体。这与在一个竞争群体中选取优胜者的生物学相仿。
- 在任一代中如果存在两个完全相同的个体，则用随机产生的新个体取代其中之一。这有助于改善种群的多样性，防止种群出现停滞。
- 以一定概率对个体进行变异（随机改变一位）。用户可对变异率进行设置。
- 对于约束优化问题，采用外点罚函数将约束问题转化为无约束问题。将罚函数定义在可行域外部，这样在计算时只需考虑违反约束的设计。适应度函数定义如下：

$$\tilde{f}_0(x)+r\sum_{i-1}^{m}\max\left[(g_j(x)-1)^t.0\right]$$

式中，$\bar{f}_0(x)$ 是正则化了的目标函数；r 是罚函数乘子；t 定义了罚函数的类型。

- 与其他优化方法相比，遗传算法没有明显的收敛特性。通常，用户通过定义最大迭代次数和种群数来控制计算量。
- 除了最大迭代次数，HyperStudy 引入全局搜索水平（level of global search）来加强对收敛过程的监控。其基本原理是，越高的全局搜索水平对应着越严格的收敛准则，算法将采用更多的随机操作对整个设计空间进行搜索。
- 如果采用二进制编码，则连续变量将被离散化。用户可以通过离散度（discrete states）定义连续变量的离散化程度。默认值为 1024（2^{10}）。
- 从 11.0 开始，HyperStudy 提供了实数制编码方式。对于连续优化问题，实数制编码方式可获得更高的精度。

11.3.5 基于可靠性评估的序列优化方法（SORA）

SORA 是美国西北大学的 W.Chen 博士和 X.Du 博士开发的一种可靠性/鲁棒性优化算法。经西北大学授权，HyperStudy 继承并改进了该算法。

SORA 属于概率（随机）优化的范畴。在随机优化中考虑了优化问题中变量取值的不确定性（用概率信息进行定义）。这意味着 SORA 将确定性优化问题拓展到能对系统的不确定性进行考虑。这种不确定性通常是通过对约束设置目标概率进行定义的。基于可靠性的优化问题定义如下：

寻找合适的 d，μx 取值，以满足以下内容：

✓ 最小化目标函数 f（d,x,p）。

✓ 设计约束条件为 Prob{gi（d,x,p）} > Ri（i=1,2,⋯,m）

式中，d 表示确定性设计变量（无不确定性）；x 表示随机设计变量（存在不确定性因素）；p 表示纯粹随机参数（不驱动设计，此类参数的取值在优化过程中不发生变化）。

在 HyperStudy 中，通过以下设置可启动 SORA：

（1）定义确定性的或随机的设计变量。

（2）对随机设计变量，取其平均值作为设计变量。

（3）定义确定性的或随机的约束条件。

（4）给随机约束定义目标概率。

HyperStudy 将 SORA 扩展到能处理鲁棒性优化问题。基于目标函数的百分位数，它对目标函数的平均值和标准差同时进行优化。

11.3.6 基于 ARSM 的 SORA

作为一个强有力的工具，自适应响应面法可以与 SORA 方法相结合以进一步提高优化效率。优化迭代是基于对模型响应所构建的近似函数进行的。迭代设计点可用来更新近似函数从而得到更高的精度的优化结果。与 SORA 相比，基于 ARSM 的 SORA 在优化效率上得到了很大的提升，但以牺牲计算精度为代价。

11.3.7 多目标遗传算法（MOGA）

MOGA 吸取了 HyperStudy 内置遗传算法的优点，用来处理有约束或无约束的多目标优化问题。与其他各类多目标优化算法类似，MOGA 提供了一系列的帕雷托解（Pareto-optimal solutions），而非单一解。

HyperStudy 中的 MOGA 包含以下内容：

✓ 非支配分类策略。

✓ 对设计点的拥挤距离进行评价以获得更均匀的设计点分布，HyperStudy 提供了 3 种准则对拥挤距离进行评价（设计空间、解空间、设计及解空间）。

✓ 保存全局非支配设计点。也就是说，非支配设计点的个数不受种群大小的限制。这

有助于获取更多的非支配设计点。

- ✓ 提供最小与最大迭代次数给用户设计，终止准则更为灵活。

11.3.8 基于梯度的多目标优化方法（GMMO）

GMMO 是 Altair 具有自主知识产权的优化方法。它将一特定的基于梯度的优化算法拓展至多目标领域。它能对帕雷托面（Pareto-front）进行有序而高效的搜索。一般来说，GMMO 在默认参数设置下可以获得较好的结果。高级用户可通过以下参数对 GMMO 进行更好地控制：

- ✓ 最大分析次数。
- ✓ 最大非支配点个数。
- ✓ 梯度法的标准收敛准则。

最大非支配点个数控制了非支配点的密度。该参数的取值越大，设计点分布在帕雷托面上的密度也越大。由于 GMMO 是基于梯度的优化方法，它没有 MOGA 的全局优化特性。

11.4 随机性研究

11.4.1 为什么需要随机性研究

不确定性在任何系统中都存在。不确定性在一个系统中可能与下列条件中的部分或全部因素有关：

- ➢ 载荷（Loading conditions）。
- ➢ 边界及初始条件（Boundary and initial conditions）。
- ➢ 材料特性（Material properties）。
- ➢ 几何结构（Geometry）。
- ➢ 概念建模（Conceptual modeling）。
- ➢ 数学建模（Mathematical modeling）。

11.4.2 统计分布

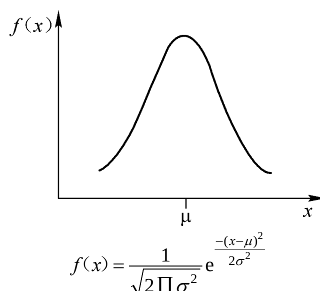
设计变量的特征可以用各种统计分布来进行描述。用于统计范畴的设计变量称为随机变量。通常来说，“随机变量”意味着该变量的取值是不知道的。但就统计意义上来说，它的取值以及相关联的概率是能准确知道的。

参数的取值不同，设计变量会表现出不同的特性。变量的分布可能对称于期望值，也可能偏于两侧；可能具有上下限，但也可能是无界的。

随机变量可分为连续型随机变量和离散型随机变量。当一个随机变量在给定区间中可以取所有值时，这个随机变量可以被认为是连续的。反之，当一个随机变量只能取给定区间中有限个值时，这个随机变量可以被认为是离散的。

1．正态分布

正态分布是最重要的统计分布之一。正态分布的重要性在于它能近似描述许多现象的本质。其数学特征也引起广泛关注。正态分布如图 11−23 所示。



$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\Pi\sigma^2}}\mathrm{e}^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

图 11−23　正态分布

式中，μ为正态分布数学期望；σ为标准差。

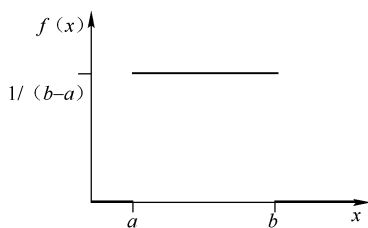
由于无法得出完整的累积分布方程，通常用数值方法来近似。

2．均匀分布

均匀分布如图 11−24 所示。

3．三角分布

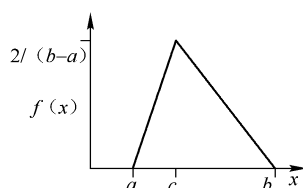
三角分布如图 11−25 所示。



$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{b-a} & a\leqslant x\leqslant b\\ 0 & 其他\end{cases}$$

$$F(x)=\begin{cases}0 & x<a\\ \dfrac{x-a}{b-a} & a\leqslant x\leqslant b\\ 0 & x<b\end{cases}$$

图 11−24　均匀分布



$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a\leqslant x\leqslant c\\ \dfrac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & a\leqslant x\leqslant b\\ 0 & 其他\end{cases}$$

$$F(x)=\begin{cases}0 & x<a\\ \dfrac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} & a\leqslant x\leqslant c\\ 1-\dfrac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} & c<x\leqslant b\\ 1 & b<x\end{cases}$$

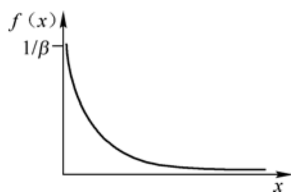
图 11−25　三角分布

4．指数分布

指数分布如图 11−26 所示。

5．威布尔分布

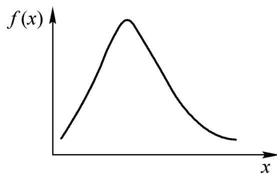
威尔分布如图 11−27 所示。



$$f(x)=\begin{cases}\frac{1}{\beta}e^{\frac{-x}{\beta}} & x\geqslant 0\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

$$F(x)=\begin{cases}1-e^{\frac{-x}{\beta}} & x\geqslant 0\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

图 11–26 指数分布



$$f(x)=\begin{cases}\alpha\beta^{-\alpha}x^{\alpha-1}e^{-\left(\frac{-x}{\beta}\right)^{\alpha}} & x>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

$$F(x)=\begin{cases}1-e^{-\left(\frac{-x}{\beta}\right)^{\alpha}} & x>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

图 11–27 威布尔分布

11.4.3 采样

采样就是给随机变量取值的方法。Altair HyperStudy 为用户提供了以下 3 种采样算法：

✓ 简单随机采样。

✓ 拉丁超立方采样。

✓ 哈默斯雷采样。

以下将对这 3 种采样方法进行简要讨论。

1．简单随机采样

简单随机采样是一种传统的采样方法，又称蒙特卡洛方法（Monte Carlo）。简单随机采样需要大量的样本。值得注意的是，为了得到较高置信度的分析结果，基于蒙特卡洛方法的随机性分析往往需要进行大量的样本和计算，并因此而耗费大量的计算资源。

2．拉丁超立方采样

由 McKay、Conover 和 Beckman 在 1979 年提出的拉丁超立方采样，能用较少的样本对输出统计结果精确估计，可用于替代简单随机采样。拉丁超立方算法使用约束或分层的采样技术。

拉丁超立方采样按以下方式从每个变量（$x1, \cdots, xk$）中选取 n 个不同的值。

（1）将每个随机变量的取值范围划分为 n 个等概率的无重叠子区间。

（2）在每个子区间中按照其概率分布随机选取一点。

（3）对从 $x1$ 中选取的 n 个值与 $x2$ 中的 n 个值进行随机组合。再将该 n 对值与 $x3$ 的 n 个值进行随机组合，直到所有变量组合完毕。

分层抽样的优点在于所选取随机变量的数值能均匀地分布在各个随机变量的取值区间中，且考虑了这些随机变量的概率密度函数。

3．哈默斯雷采样

哈默斯雷采样属于类蒙特卡洛方法。基于哈默斯雷点，该算法采用伪随机数值发生器，均匀地在一个超立方体中进行抽样。哈默斯雷采样的优点在于可用较少的样本提供

对输出统计结果的可靠估计。同时，它能在 K 维超立方体上取得很好的均匀分布，这是哈默斯雷采样优于拉丁超立方采样的特性。拉丁超方采样只能在一维问题上有好的均匀性。

11.4.4 相关性

相关性分析是一种使用数值方法评价两个变量间关联程度的方法。它的变化区间从 0（随机相关）～1（完全线性相关）或−1（完全负线性相关）。

HyperStudy 使用 Iman 和 Conover 开发的配对步骤来导出两个随机变量之间的相关系数。这种诱导相关是基于一种叫做秩相关系数（Rank Correlation）的非参数化技术。当相关系数被定义为成对的随机变量时，就能列举出多变数（Multivariate）的相关系数。例如，有 3 个随机变量 A、B 及 C。它们之间的相关系数被定义如下：

Correlation (A, B) = 0.5

Correlation (A, C) = 0.5

Correlation (B, C) = 0.5

则基于两变数（Bivariate）的多变数（Multivariate）相关系数矩阵如图 11−28 所示。

	A	*B*	*C*
A	1.0	0.5	0.5
B	0.5	1.0	0.5
C	0.5	0.5	1.0

图 11−28　相关系数矩阵

值得注意的是，在定义相关度矩阵的过程中，数学上的约束是首先需要满足的。例如以下这种情况：

Correlation (A, B) = −0.9

Correlation (A, C) = −0.9

Correlation (B, C) = −0.9

这里列举的相关系数值意味着 A 的大值将与 B 和 C 的小值配对，而 B 和 C 的相关系数则表明 B 的大值需和 C 的小值配对。以上所定义的关系在数学上是不可行的，也就不能由任何抽样算法得到。

11.4.5 后处理数据分析

HyperStudy 向用户提供了以下几种后处理方式进行数据分析：

1．Ant Hill Plots （蚁山图）

蚁山图包含关于研究对象的大量信息。这类信息只有通过随机性分析才能获取。蚁山图用来表明变量与响应之间，或响应与响应之间的依赖关系。二维的蚁山图，如图 11−29 所示。

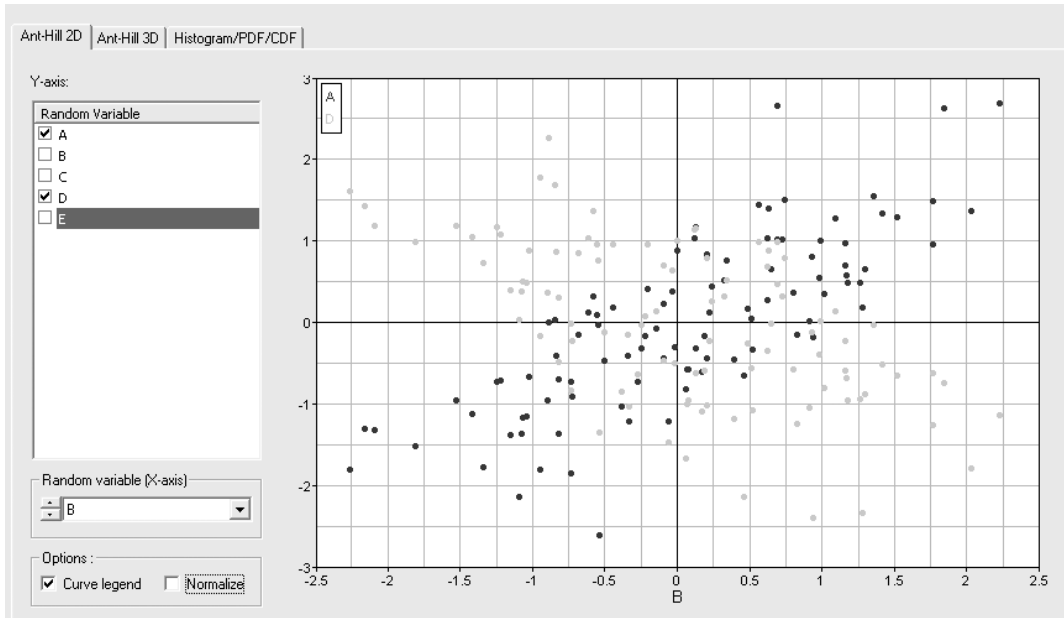


图 11−29　二维的蚁山图

2．直方图（Histogram）、概率分布函数（PDF）和累积分布函数（CDF）

在 HyperStudy 随机性分析数据后处理中，使用直方图、概率分布函数和累积分布函数这 3 类图来表征输出相应的概率函数，如图 11−30 所示。直方图显示了响应在一个子区间出现的频率。子区间的大小等于响应值的总范围除以方块数。概率分布函数（PDF）曲线图表示响应函数在某一特定取值处取值的概率。累积分布函数（CDF）曲线图表示响应函数值小于或等于某一特定值的概率。PDF 和 CDF 的精确程度由方块的数量决定。

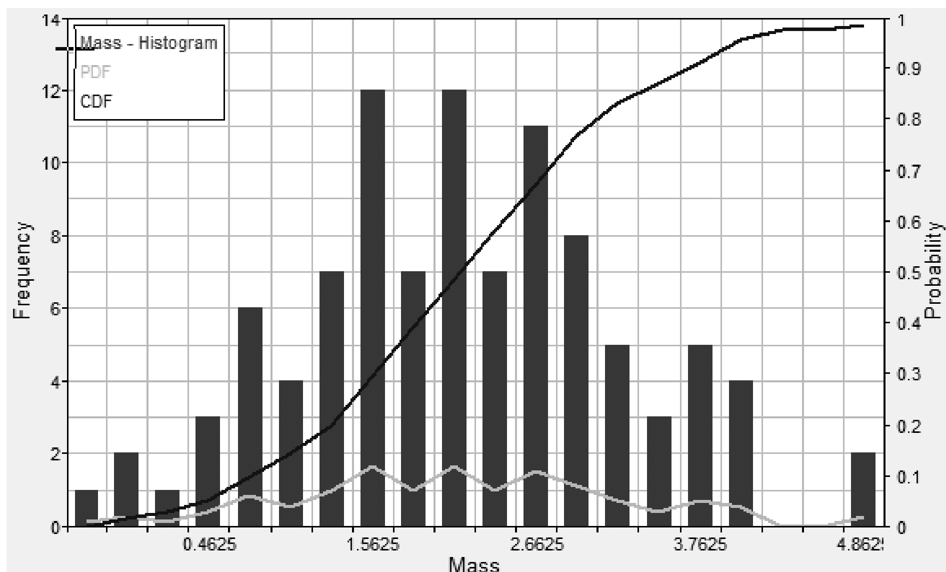


图 11−30　直方图、概率分布函数和累积分布函数

3．统计数据

HyperStudy 支持表 11−7 所示的统计数据。

表 11−7　统计数据说明

平均值（Mean）	用以描述某一响应最有可能的取值
均差	均差使用下式进行计算： $$\frac{\sum_{i=1}^{N} \lvert X_i - \bar{X} \rvert}{N}$$ 上图的横轴表示某矢量的平均值，纵轴表示其真实取值与平均值之间的差异。均差是矢量元素和矢量元素的平均值之间的平均差值。当计算偏差时没有考虑每个元素的符号。而计算均差时需要考虑每个元素的符号
方差	方差用以下公式进行计算: $$\frac{\sum_{i=1}^{N} \lvert X_i - \bar{X} \rvert^2}{N-1}$$
标准差	标准差（Standard deviation）是方差的平方根。它是衡量离散程度的常用方法
变异系数（CoV）	变异系数是对相对离散度的衡量，用下式进行计算： *CoV*=标准差/均值 变异系数部分源自于这样一个事实：均值和标准差在很多实验中会一起变化。CoV 的值越大，变异越大。反之，CoV 的值越小，变异越小。当均值接近于零时，很少使用变异系数
偏移量	表示概率分布是偏向左还是偏向右。如果偏移量是 0，则该函数是关于平均值对称分布的。如果偏移量小于 0，则概率分布偏向分布平均值的左边。如果偏移量大于 0，概率分布偏向分布平均值的右边
中位数	标量的中位数是其本身 奇数个元素的向量的中位数是这个有序向量的中间元素的值 偶数个元素的向量的中位数是这个有序向量距离中间最近的两个元素的算术平均值
均方根	均方根取该响应所有有效数据平方和的算术平均值的平方根，如下式所示： $$\sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N}}$$
最小值	所有输出响应中的最小值
最大值	所有输出响应中的最大值
可靠度	某一响应所表征的结构或功能满足设计约束的可靠性
失效概率	某一响应所表征的结构或功能违反设计约束的可能性

11.5 小结

本章介绍了 HyperStudy 采用的优化设计和统计分析等方法及其原理，包括试验设计、近似模型、优化和随机性研究方面的内容。需要注意的是，在实际应用中，读者需要明确所研究问题的目的，并参考相关文献了解本行业本专业所采用的成熟方法，然后采用合适的技术，才能较快地得到对系统变化趋势的定性或定量的判断，最终达到事半功倍的效果。

对于大规模的系统研究优化问题（如大量的变量和多个学科的综合考虑），如何对问题进行合理简化，控制计算规模，同高性能计算集群进行连接，关系到问题是否能最终求解，需要特别注意。

第 12 章

HyperStudy 基础练习



本章将通过实例练习的方式向读者介绍和演示 HyperStudy 以下几个方面的应用：

- 基于 Templex 模板的准备、建模、试验设计与优化。
- 基于 HyperMesh-HyperStudy 集成的建模与优化。
- 尺寸优化和可靠性设计优化。
- 多模型多学科联合优化。

本章重点知识

12.1　实例：基于 Templex 的优化分析
12.2　实例：基于 Templex 的 DOE 分析
12.3　实例：通过参数化 Bulk 文件进行尺寸优化
12.4　实例：通过 HyperMesh 进入尺寸优化
12.5　实例：通过参数化 Block 文件进行尺寸优化
12.6　实例：碰撞分析的可靠性优化
12.7　实例：多学科优化研究
12.8　小结

12.1 实例：基于 Templex 的优化分析

本实例将演示如何优化一个用 Templex 模板定义的简单函数。模型输入文件位于 <install_directory>/tutorials/hst/Simple/，将其复制至工作目录下。

模型输入文件定义了两个设计变量 DV1 和 DV2，分别用 X 和 Y 表示。优化的目标是在保证 $1/X+1/Y-2<0$ 的情况下，最小化 $X+Y$。

本实例从 HyperGraph 中启动 HyperStudy，也可以从 HyperView、MotionView 中启动 HyperStudy，或者直接启动 HyperStudy。

STEP 01 在 HyperGraph 中查看模型输入文件模板

（1）启动 HyperGraph。

（2）将模块选择器切换到 TextView，如图 12-1 所示。

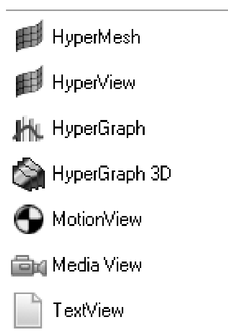


图 12-1　模块选择

（3）单击工具栏上的 Open Document 按钮。

（4）使用文件浏览器打开位于工作路径下的文件 Simple.tpl。

显示如下文本：

```
{parameter (DVAR1,"Area 1",.5,0.2,5)}
{parameter (DVAR2,"Area 2",.5,0.2,5)}
{RES = DVAR1 + DVAR2}
{CON = 1/DVAR1 + 1/DVAR2 - 2}
{RES}
{CON}
{DVAR1}
{DVAR2}
```

（5）单击工具栏上的 Edit Text 按钮。

执行 Templex 语句，各参数将被其初始值取代，如下所示：

```
1.0
2.0
0.5
0.5
```

STEP 02 启动 HyperStudy

（1）从 HyperGraph 的 Applications 下拉菜单中选择 HyperStudy 命令。

STEP 03 建立 study

（1）单击 Add study 并选择 New，显示 Add Study 对话框。

（2）单击 OK 按钮接受默认的 Label 和 Variable 设置。

（3）使用窗口右上角的 Study directory 文件浏览器选择工作目录。

（4）单击 Next 按钮弹出 Create models 窗口。

（5）单击 Add model 并将 Model type 设置为 Template。

（6）单击 OK 按钮，列表中将添加一个新模型。

（7）用右上角的文件浏览器选择 Template file。

（8）打开工作路径下的文件 Simple.tpl。

（9）单击 Next 按钮弹出 Create design variables 窗口。

（10）检查设定的上限、下限。

（11）单击 Next 按钮弹出 Do nominal run 窗口。

（12）在 Solver input file 处输入 res。这是 HyperStudy 为求解器创建的输入文件的文件名。

（13）从 Solver execution script 下拉菜单中选择 Templex 命令。

Templex 输入文件请输入 res，无需编辑 Solver input arguments 选项，如图 12-2。

Model	Solver input file	Solver execution script	Solver input arguments
Model_1	res	Templex	$file

图 12-2　求解设定

STEP 04 执行初始计算

（1）单击 Write 按钮然后单击 Execute 按钮。

在 study 路径下创建一个 nom_run/m_1 路径。res 是 nominal run 的结果文件，这些文件位于 nom_run/m_1 路径下。

（2）单击 Next 按钮到 Create responses 面板。

STEP 05 定义响应

（1）单击 Add response 按钮。

（2）单击 OK 按钮。

（3）重复执行第 1 步和第 2 步的操作创建第二个响应。

（4）单击 Response_1 按钮。

（5）单击 Expr Builder 按钮，弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 对话框。

（6）在 Vectors 标签页单击 Add 按钮，添加了一个结果矢量 Vector_1。现在需要定义这个矢量。

（7）单击 Vector resource file 下面的文件浏览按钮，选择 res 文件。res 文件包含矢量{1.0, 2.0}。

（8）单击 Apply 按钮提取这个矢量，表达式中将引用该矢量。矢量的第一个值为 Response_1，第二个值为 Response_2。

（9）在 Response expression 处，在 v_1 后面输入[0]，得到 v_1[0]，即选择矢量的第一个变量。

（10）选中 Evaluate expression 复选框，表达式 v_1[0]将变为 1。

（11）单击 OK 按钮。

（12）单击 Response_2。

（13）再次单击 Expr Builder 按钮，依然选择 Vector1。

（14）单击 Apply 按钮提取该矢量，表达式中将引用该矢量。

（15）在 v_1 后面输入[1]，得到 v_1[1]，即选择矢量的第二个变量。

（16）选中 Evaluate response expression 复选框，表达式 v_1[1]将变为 2。

（17）单击 OK 按钮，这样就完成了 study 的设定。现在可以继续执行所需的分析（DOE、优化以及随机分析）。

STEP 06 运行一个优化 study

（1）在导航树中单击 Create optimization study。

（2）单击 Add optimization 并单击 OK 按钮。

（3）在窗口的右上角选择 Optimization Engine: (ARSM) - Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮弹出 Define design variables 窗口。这里可以检查设计变量。

（5）单击 Next 按钮弹出 Constraints 窗口。

（6）单击 Add constraint。

（7）单击 OK 按钮。

（8）从 Apply Constraint On 的下拉菜单中选择 Response_2。

（9）使用 Bound Type <=（小于等于）将上限设置为 0。

（10）单击 Next 按钮弹出 Objectives 窗口。

（11）单击 Add Objective。

（12）单击 OK 按钮。

（13）从 Apply On 下拉菜单中选择 Response_1。

（14）从 Objective 下拉菜单中选择 Minimize。这里无需修改优化参数。

（15）单击 Launch optimization 提交优化作业。将有一个信息提示窗口提示优化的模式，交互模式或批处理模式。

（16）单击弹出对话框中的 Yes 按钮选择交互模式。

可以通过 HyperStudy 的 Tools 下拉菜单中的 Job management/Optimization Study 改变优化的模式。

（17）优化完成后，单击 Next 按钮弹出 Post-processing 窗口。

STEP 07 查看优化的迭代历史

（1）Optimization results plot file 处将自动加载、显示工作路径下的结果文件 opt_1.hgres。

（2）在 Obj. & Constr.,DV 和 Resp 各自的标签页中，将显示其相应的曲线。单击复选框以显示相应的迭代历史。

12.2 实例：基于 Templex 的 DOE 分析

本实例将演示如何执行用 Templex 模板定义的简单函数的 DOE 分析。

模型输入文件定义了两个设计变量 DV1 和 DV2，分别用 X 和 Y 表示。本实例的目标是研究两个设计变量 X、Y 所构成的两个函数 $X+Y$ 和 $1/X+1/Y-2$。

在本实例开始之前，应完成 12.1 小节的实例，并加载该实例。

STEP 01 执行一个 DOE 分析

（1）单击导航树中的 Create DOE study。

（2）单击 Add DOE Study。

（3）单击 OK 按钮。

（4）在 Controlled factors 下有一个 DOE Class 选项，从下拉菜单中选择 Full Factorial 命令。

（5）单击 Next 按钮弹出 Controlled Variables 窗口。将各设计变量的 levels 增加到 3，从默认选择的 Area 1 开始。

（6）选择设计变量 Area 1，将 No. of Level 从 2 切换到 3，如图 12-3 所示。

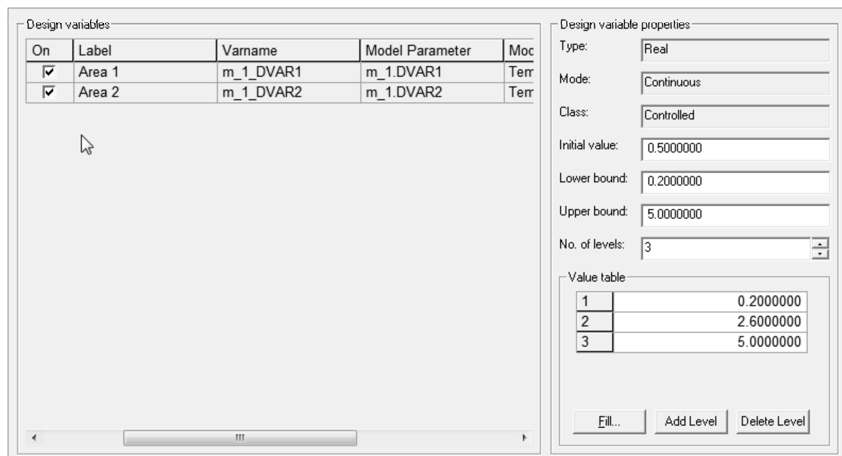


图 12-3　更改设计变量的水平

改变 No. of levels 将在下限和上限之间进行插值。单击 Add Level 按钮插入可编辑的 levels。

（7）对设计变量 Area 2 重复执行上述操作。

（8）单击 Next 按钮，弹出 Controlled Interactions 窗口。这里无需修改任何选项。

（9）单击 Next 按钮，Controlled Allocations 页面显示了由设计变量及其组合构成的包含 9 个元素的设计矩阵。

（10）单击 Next 按钮，弹出 DOE responses 对话框。

（11）检查一下响应。

（12）单击 Next 按钮，弹出提交 study 的窗口。

（13）单击 Write/Execute 按钮。

（14）在弹出的窗口中单击 Yes 按钮，这意味着执行 9 个 runs。

（15）单击 Next 按钮，弹出 Extract responses 窗口。

（16）单击 >> Extract >>，这将提取九个 runs 中定义的响应。

（17）提取出结果后，单击 Next 按钮，弹出 Post-processing 窗口。

STEP 02 对 DOE 分析的结果进行后处理

在 Post Processing 模块中可以查看主效应和相互作用。图 12-4 显示的是变量 Area 1 和 Area 2 对响应的主效应。

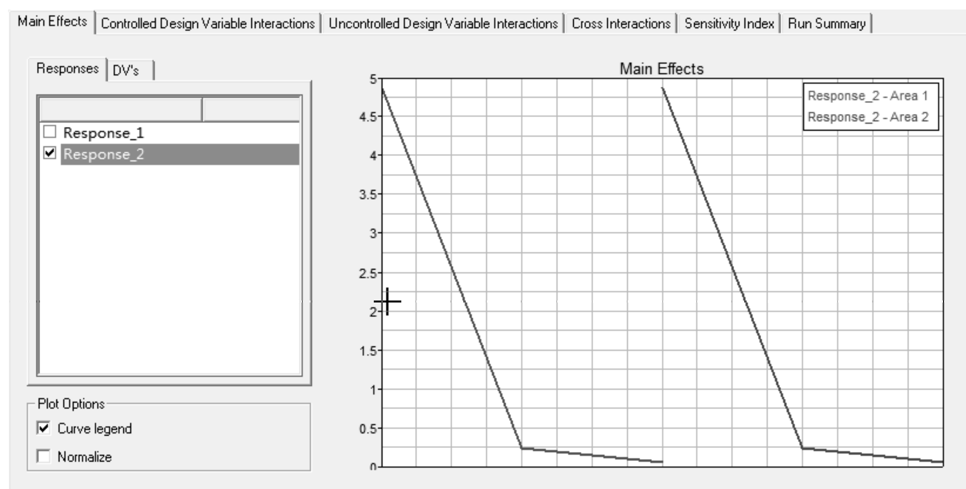


图 12-4 变量 Area 1 和 Area 2 对响应的主效应

单击 Run Summary 标签页中的 Visualize 按钮，DOE 分析的结果将显示在 Post Processing 模块中。相关系数矩阵如图 12-5 所示。

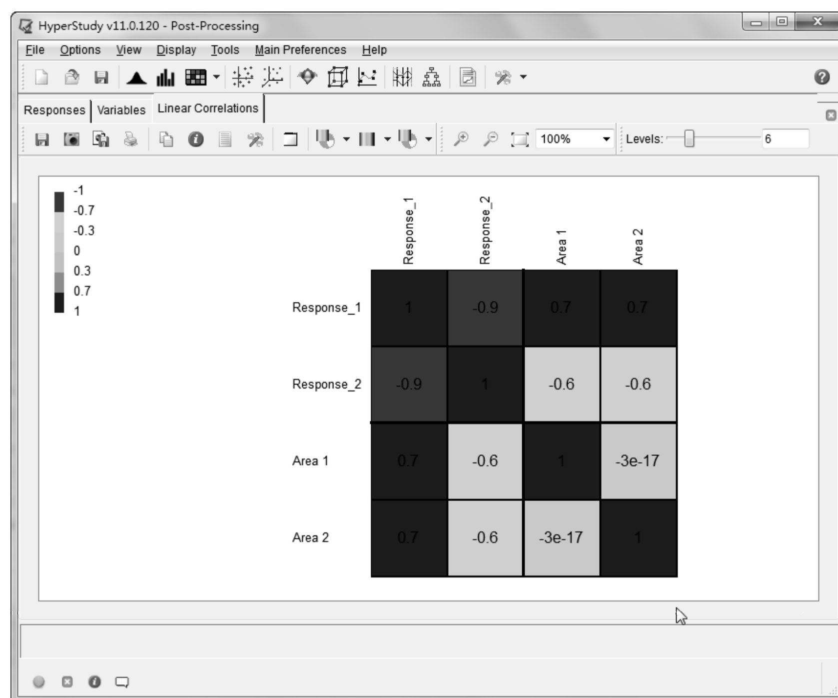


图 12-5 相关系数矩阵

12.3 实例：通过参数化 Bulk 文件进行尺寸优化

本实例将演示如何在 HyperStudy 中建立 RADIOSS bulk data 格式有限元模型的尺寸优化问题。模型文件位于 HyperWorks 安装目录<install_directory>/tutorials/hst/radioss/下，将其复制至工作路径下。

在本实例中，将会进行以下练习：

✓ 使用 HyperStudy Parameterizer 将 bulk data 输入文件创建为一个模型输入文件模板。

✓ 执行一个初始计算。

✓ 执行一个优化分析。

路径中包含以下文件：

✓ plate.fem 初始输入文件。

✓ plate.tpl 模型输入文件模板。

本实例中优化的目标是最小化平板（见图 12-6）的体积，应力约束为第 43 号单元应力小于 22MPa。设计变量为 plate.fem 文件中 PSHELL 卡片定义的 3 个组件的厚度。厚度的初始值为 0.15，上、下限分别为 0.15 和 0.05。优化类型为尺寸优化。

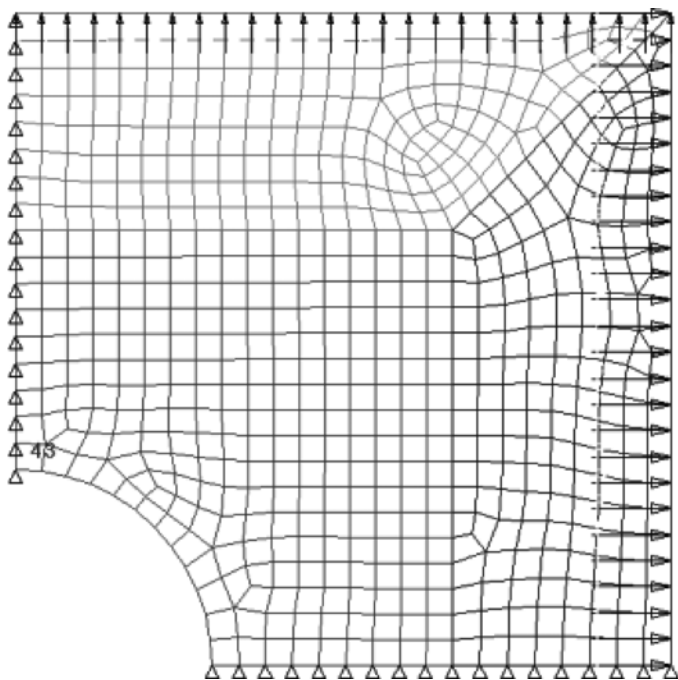


图 12-6　对称平板模型

STEP 01 在 HyperStudy 中创建一个模型输入文件模板

（1）启动 HyperStudy。

（2）进入 Utilities 下拉菜单并选择 Editor 命令。

（3）在弹出的窗口中，进入 File 下拉菜单并选择 Open As: RADIOSS Bulk data/OptiStruct 命令。

（4）打开文件 plate.fem。

（5）在 Edit 下拉菜单中，使用 Find 查找 PSHELL，将找到 3 个 PSHELL 卡片，每个卡片包含 10 个 8 字符宽的字段。第四个字段定义了壳的厚度。为了定义设计变量，需要用一个特定格式的 Templex 语句来取代这 8 个字符段。

（6）进入下拉菜单 Preferences 并选择 Options 命令。

（7）进入 General 标签页，为选定的字段定义参数，如图 12-7 所示。

Variable name prefix	Variable_
Bounds (+/- %%)	10
Format selector	8
Number of decimals	5
Format type	Fixed

图 12-7　定义选择参数

（8）单击 Apply 按钮并单击 Close 按钮。

（9）按住〈Ctrl〉键，将光标移动至 0.1 的左侧并按鼠标左键，8 个字符长的字段将高亮显示。

（10）单击鼠标右键，弹出设置面板，如图 12-8 所示。

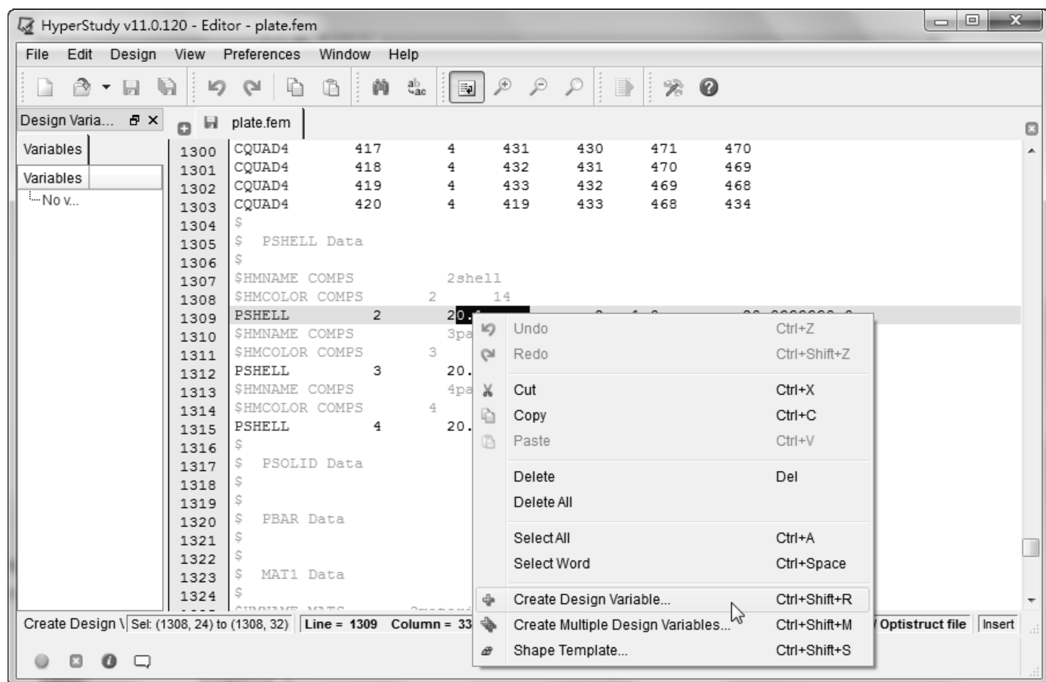


图 12-8　创建设计变量

（11）单击 Create Design Variable。

（12）在弹出的窗口中，按照下列列表输入相应的值。

Name: TH1

Label: Property 1

Description: Property 1

Initial value: 0.1

Lower Bound: 0.05

Upper Bound: 0.15

Format: %8.5f

（13）单击 OK 按钮，这样就定义了第一个设计变量，变量名以蓝色的字体显示。

（14）重复第 8～12 步的操作分别为 Property2 和 Property3 定义设计变量 TH2 和 TH3。

（15）单击 Show/Generate Templex button 以创建 Templex 文件。

（16）检查一下 Templex 语句。

（17）进入 File 下拉菜单并单击 Save 按钮保存文件 plate.tpl。

（18）关闭 Create Template 窗口。

STEP 02 用 HyperGraph 检查模型输入文件模板

（1）启动 HyperGraph。

（2）将 Select application 切换到 TextView。

（3）在工具栏上单击 Open Document 按钮。

（4）在弹出的文件浏览器中选择工作路径下的模板文件 plate.tpl。

（5）单击 Open 按钮。

（6）在文件的最上方，3 个 Templex parameter 语句定义了 3 个设计变量：

```
{parameter(TH1,"Property 1",0.1,0.05,0.15)}
{parameter(TH2,"Property 2",0.1,0.05,0.15)}
{parameter(TH3,"Property 3",0.1,0.05,0.15)}
```

在文档中搜索 PSHELL，将发现参数化的 PSHELL 卡片，这些卡片与设计变量相关联：

```
$   PSHELL Data
$
PSHELL          2       2{TH1,%8.5f}      2     1.0       20.8333330.0
$HMNAME COMPS             3patch1
$HMCOLOR COMPS          3        11
PSHELL          3       2{TH2,%8.5f}      2     1.0       20.8333330.0
$HMNAME COMPS             4patch2
$HMCOLOR COMPS          4        12
PSHELL          4       2{TH3,%8.5f}      2     1.0       20.8333330.0
```

（7）在工具栏上单击 Edit Text 按钮。执行 Templex 语句，各参数将被其初始值取代。

（8）再次查找 PSHELL，将会发现以下内容：

```
$   PSHELL Data
$HMNAME COMPS             2shell
```

```
$HMCOLOR COMPS          2         14
PSHELL            2          2 0.10000         2      1.0            20.8333330.0
$HMNAME COMPS               3patch1
$HMCOLOR COMPS          3         11
PSHELL            3          2 0.10000         2      1.0            20.8333330.0
$HMNAME COMPS               4patch2
$HMCOLOR COMPS          4         12
PSHELL            4          2 0.10000         2      1.0            20.8333330.0
```

STEP 03 建立 study

（1）回到 HyperStudy 界面。
（2）单击 Add study。
（3）选择 New，弹出一个 Add Study 对话框。
（4）单击 OK 按钮。
（5）用窗口右上角的文件浏览器 Study directory 选择工作目录。
（6）单击 Next 按钮，弹出 Create models 窗口。
（7）单击 Add model。
（8）单击 OK 按钮，列表中将添加一个新模型。
（9）在右上角的文件浏览器中选择 Template file。
（10）从工作路径中选择 plate.tpl。
（11）单击 Open 按钮。
（12）单击 Next 按钮，弹出 Create design variables 窗口。
（13）检查设计变量的上限、下限。
（14）单击 Next 按钮，弹出 Do nominal run 窗口。
（15）在 Solver input Files 处输入 plate.fem，这是 HyperStudy 为求解器创建的输入文件的文件名。
（16）在 Solver execution script 下拉菜单中选择 RADIOSS。RADIOSS 的输入文件将会是 plate.fem，无需编辑 Solver input arguments 选项。

STEP 04 执行初始计算

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，HyperStudy 在 study 路径下创建一个 nom_run/m_1 路径。plate.out 和 plate.res 是初始计算的结果文件，这些文件位于 nom_run/m_1 路径下。
（2）单击 Next 按钮，弹出 Create responses 面板。

STEP 05 创建第一个响应

（1）单击 Add response。

（2）单击 OK 按钮。

重复第 1 步和第 2 步操作创建第二个响应。

（3）单击 Response_1。

（4）单击 Expr Builder。

（5）弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 对话框。

（6）在 Vectors 标签中单击 Add 按钮，添加了一个结果矢量 Vector_1。 现在需要定义这个矢量。

（7）单击 Vector resource file 下面的文件浏览按钮，选择文件 plate.out。

（8）在 Vectors 标签中通过下拉菜单选择下述选项以定义平板的体积 Vector 1：

Type: OptiStruct Analysis
Request: Out File
Component: Volume

（9）单击 Apply 按钮提取该矢量，表达式中将引用该矢量。由于该矢量只有一个数值，当单击 Apply 后，自动在 v_1 后面输入[0]，因此自动选择矢量中的第一个值（也是唯一一个值）。

（10）选中 Evaluate expression 复选框，表达式 v_1[0]将变为 232.384。

（11）单击 OK 按钮。

（12）添加另一个响应。

（13）选择 Response_2，再次单击 Expr Builder。

（14）为了定义第二个矢量，在 Vectors 中单击 Add 按钮，添加了一个名为 Vector 2 的结果矢量。

（15）在 Vector resource file 处选择所需结果所在的文件，对于 Vector 2，所需结果所在的文件是 plate.res。这个文件包含应力结果。

（16）选择以下选项以提取第 43 号单元的 von Mises 应力，并将其定义成 Vector 2：

Type: von Mises stress
Request: Element 43
Component: Value

（17）单击 Apply 按钮提取该矢量，表达式中将引用该矢量。跟 Vector 1 一样，该矢量只有一个数值，因此当在表达式中引用时，它将自动选择矢量中的第一个值（也是唯一一个值）。

（18）选中 Evaluate response expression 复选框，表达式 v_2[0]将变为 25.9234。

（19）单击 OK 按钮，完成 study 的设定。现在可以继续执行所需的分析（DOE、优化以及随机分析）。

STEP 06 执行一个优化分析

（1）在导航树中单击 Create optimization study。

（2）单击 Add optimization，单击 OK 按钮接受默认设置。

（3）在窗口的右上方，选择 Optimization Engine: (ARSM)→Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮，弹出 Design variables 对话框。

这里可以检查已定义的设计变量。

（5）单击 Next 按钮，弹出 Define constraints 对话框。

（6）单击 Add constraint。

（7）单击 OK 按钮。

（8）在 Apply Constraint On 的下拉菜单处选择 Response_2。

（9）使用 Bound Type <=（小于等于）将上限设置为 22.0。

（10）单击 Next 按钮，弹出 Define objective 窗口。

（11）单击 Add Objective。

（12）单击 OK 按钮。

（13）从 Apply On 下拉菜单中选择 Response_1。

（14）在 Objective 下拉菜单中选择 Minimize。这里无需修改优化参数。

（15）单击 Launch optimization 提交优化作业。将有一个信息提示窗口提示优化的模式，交互模式或批处理模式。可以通过 HyperStudy 中 Tools 下拉菜单中的 Job management…/Optimization Study 改变计算的模式。

提交作业后，HyperStudy 自动切换到后处理界面并加载迭代历史。

STEP 07 查看优化的迭代历史

（1）使用文件浏览器 Optimization results plot file 选择工作路径下的 opt_1.hgres 文件。

（2）单击 Open 按钮，加载该文件。

（3）单击复选框以显示相应的迭代历史。

12.4 实例：通过 HyperMesh 进入尺寸优化

本实例将演示如何在 HyperStudy 中利用 HyperMesh 所建立的模型，并以 RADIOSS（Bulk data）为求解器进行形状优化。所需的文件位于 HyperWorks 安装目录<install_directory>/tutorials/ hst/radioss/下，将其复制至工作目录。

本实例中，将会进行以下练习：

✓ 在 HyperMesh 中对有限元模型进行参数化。

✓ 执行一个初始计算。

✓ 执行一个优化分析。

路径中包含以下文件：

plate.fem 初始输入文件。

plate.tpl 模型输入文件模板

本实例中优化的目标是最小化平板（见图 12-9）的体积，应力约束为第 43 号单元应力

始终小于 22MPa。设计变量为 plate.fem 文件中 PSHELL 卡片定义的 3 个组件的厚度。厚度的初始值为 0.15，上、下限分别为 0.15 和 0.05。优化类型为尺寸优化。

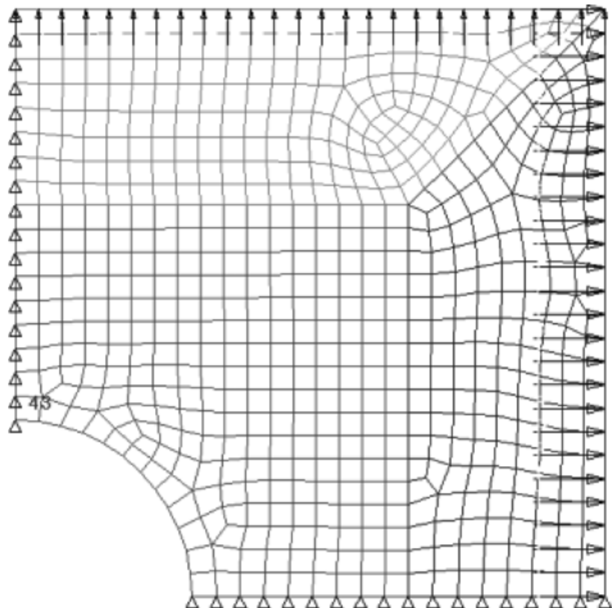


图 12-9　对称平板模型

STEP 01 在 HyperMesh 中加载模型

（1）启动 HyperMesh。
（2）选择 Preferences 下拉菜单中的 User Profile 命令。
（3）选择 RADIOSS（Bulk Data Format）或者 OptiStruct。
（4）单击 OK 按钮。
（5）从 File 下拉菜单中选择 Import。
（6）选择 Solver Input Deck。
（7）使用文件浏览器选择文件 plate.fem。
（8）单击 Import 按钮，导入有限元模型。

STEP 02 启动 HyperStudy

（1）单击 Applications 下拉菜单。
（2）选择 HyperStudy，弹出 HyperStudy 界面。

STEP 03 建立 study

（1）单击 Add Study。

（2）选择 New，弹出 Add Study 对话框。

（3）单击 OK 按钮。

（4）用窗口右上角的文件浏览器 Study directory 选择工作目录。

（5）单击 Next 按钮，弹出 Create models 窗口。

（6）单击 Add model。

（7）选择 Model type: HyperMesh。

（8）单击 OK 按钮，列表中将添加一个新模型。

（9）单击 Next 按钮，弹出 Design Variables 窗口创建设计变量。

（10）单击 Add Model Parameter，将列出模型中的各组件。

（11）展开 Thickness 选项。

（12）选择 shell.T.1。

（13）输入 Lower bound 为 0.05，Upper bound 为 0.15。

（14）单击 Add 按钮。

（15）对 patch1 和 patch2 重复执行第 12～14 步的操作。

（16）单击 OK 按钮，将返回到 Design Variables 窗口。这样就创建了 3 个设计变量。

（17）检查设定的初始值、上限、下限。

（18）单击 Next 按钮，弹出 Do nominal run 窗口。

（19）在 Solver input Files 处输入 plate.fem，这是 HyperStudy 为求解器创建的输入文件的文件名。

（20）在 Solver execution script 下拉菜单中选择 RADIOSS。RADIOSS 的输入文件将会是 plate.fem，无需编辑 Solver input arguments 选项。

STEP 04 执行初始计算

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，HyperStudy 在 study 路径下创建一个 nom_run/m_1 路径。plate.out 和 plate.res 是 nominal run 的结果文件，这些文件位于 nom_run/m_1 路径下。

（2）单击 Next 按钮，弹出 Create responses 面板。

STEP 05 创建第一个响应

（1）单击 Add response。

（2）单击 OK 按钮，重复执行第 1 步和第 2 步操作创建第二个响应。

（3）单击 Response_1。

（4）单击 Expr Builder，弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 对话框。

（5）在 Vectors 标签页，单击 Add 按钮。

（6）添加了一个结果矢量 Vector_1。现在需要定义这个矢量。

（7）选择包含结果矢量的文件。

（8）单击 Vector resource file 下面的文件浏览按钮，选择文件 plate.out。

（9）在 Vectors 标签页中通过下拉菜单选择下述选项以定义平板的体积 Vector 1：

Type: OptiStruct Analysis
Request: Out File
Component: Volume

（10）单击 Apply 按钮提取该矢量，表达式中将引用该矢量。由于该矢量只有一个数值，当单击 Apply 按钮后，自动在 v_1 后面输入[0]，因此自动选择矢量中的第一个值（也是唯一一个值）。

（11）选中 Evaluate expression 复选框，表达式 v_1[0]将变为 232.384。

（12）单击 OK 按钮。

（13）单击 Response_2。

（14）再次单击 Expr Builder。

STEP 06 定义第二个矢量

（1）在 Vectors 标签页，单击 Add 按钮，添加了一个名为 Vector 2 的结果矢量。

（2）在 Vector resource file 处选择所需结果所在的文件，对于 Vector 2，所需结果所在的文件是 plate.res。这个文件包含应力结果。

（3）选择以下选项以提取第 43 号单元的 von Mises 应力，并将其定义成 Vector 2：

Type: von Mises stress
Request: Element 43
Component: Value

（4）单击 Apply 按钮提取该矢量，表达式中将引用该矢量。跟 Vector 1 一样，该矢量只有一个数值，因此当在表达式中引用它时，它将自动选择矢量中的第一个值（也是唯一一个值）。

（5）选中 Evaluate response expression 复选框，表达式 v_2[0]将变为 25.9234。

（6）单击 OK 按钮，完成 study 的设定。现在可以继续执行所需的分析（DOE、优化以及随机分析）。

STEP 07 执行一个优化分析

（1）在导航树中单击 Create optimization。

（2）单击 Add optimization。

（3）在窗口的右上方，选择 Optimization Engine: (ARSM) - Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮，弹出 Design variables 对话框。这里可以检查定义的设计变量。

（5）单击 Next 按钮，弹出 Define constraints 对话框。

（6）单击 Add constraint。

（7）单击 OK 按钮。

（8）在 Apply Constraint On 的下拉菜单处选择 Response_2。

（9）Bound Type 选择 <= ，将上限设置为 22.0。

（10）单击 Next 按钮，弹出 Define objective 窗口。

（11）单击 Add Objective。

（12）单击 OK 按钮。

（13）从 Apply On 下拉菜单中选择 Response_1。

（14）在 Objective:下拉菜单中选择 Minimize。这里无需修改优化参数。

（15）单击 Launch optimization 提交优化作业。将有一个信息提示窗口提示优化的模式，交互模式或批处理模式。可以通过 HyperStudy 中 Tools 下拉菜单中的 Job management/ Optimization Study 改变优化的模式。

（16）优化完成后，单击 Next 按钮，弹出 Post-processing 窗口。

STEP 08 查看优化的迭代历史

（1）使用文件浏览器 Optimization results plot file 选择工作路径下的 opt_1.hgres 文件。

（2）单击 Open 按钮加载该文件，在 Obj. & Constr., DV 和 Resp 各自的标签页中，将显示其相应的曲线。

（3）单击复选框以显示相应的迭代历史。

12.5 实例：通过参数化 Block 文件进行尺寸优化

本实例将演示如何使用 HyperStudy 驱动 RADIOSS 对有限元模型进行尺寸优化。图 12-10 显示了 Block 格式的 RADIOSS 模型。运行该模型需要 RADIOSS Starter File 和 RADIOSS Engine File。可以在目录<install_directory>/tutorials/hst /radioss/下找到上述两个文件，并将这一系列文件复制至工作文件夹中。运行后得到 t=2s 的仿真结果，如图 12-11 所示。

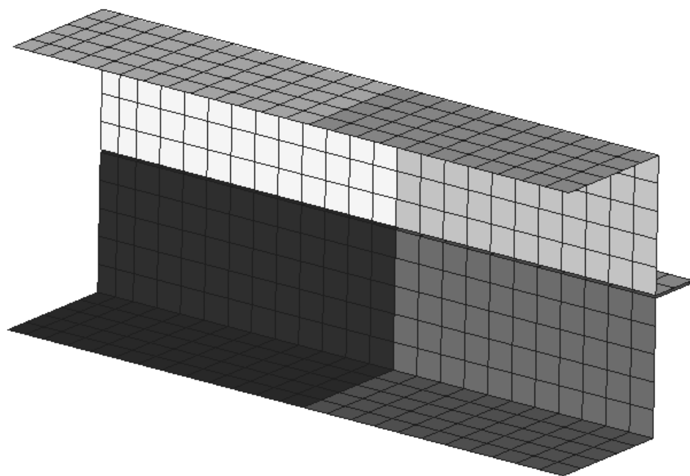


图 12-10　Boxbeam 初始有限元模型

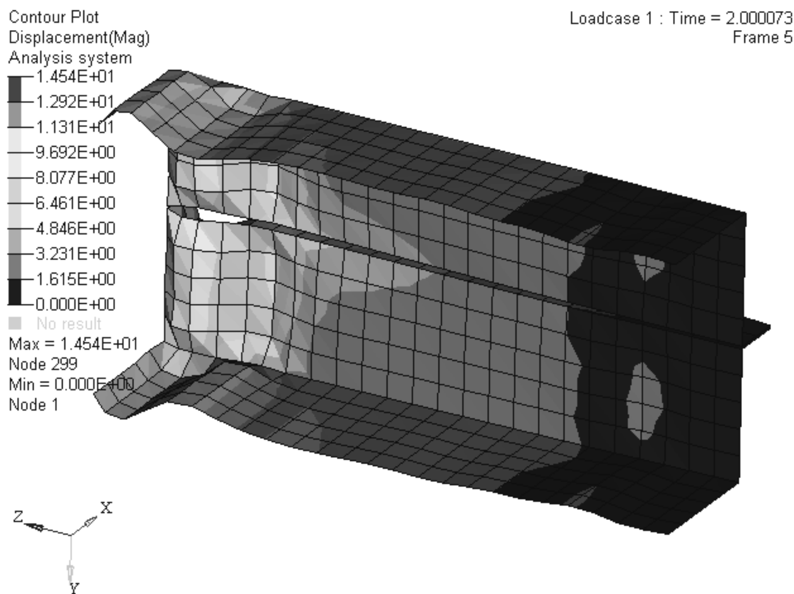


图 12-11 Boxbeam 模型

该文件夹中包括以下 3 个文件：

✓ boxbeam1_0000.rad：RDIOSS Starter File，包括有限元模型及边界条件的相关信息。

✓ boxbeam1_0001.rad：RADIOSS Engine File，包括求解控制及输出控制的相关信息。

✓ boxbeam1.tpl：优化模板文件。

该模型的优化目标是在满足两个约束条件（内能小于 450 和支反力小于 75）的前提下，最小化模型质量。模型的设计变量为模型中 4 个构件的厚度。厚度信息可以在 RADIOSS Block 输入文件 boxbeam.1_0000.rad 中，查看/PROP/SHELL 关键字以获得。4 个厚度被合并为两个设计变量，分别对应模型的两部分。薄壁结构厚度可以在 0.5～2.0 之间变化，其初始厚度为 1.0。优化类型为尺寸优化。

STEP 01 在 HyperStudy 中建立基本的输入模板

（1）启动 HyperStudy。

（2）在 Tools 下拉菜单中选择 Create Template。

（3）在弹出的窗口中，单击 File 中的 Import，选择 boxbeam1_0000.rad。

（4）在 Edit 下，使用 Find…搜索关键字/PROP/SHELL。在关键字/PROP/SHELL 中，可以通过标识 Thick 找到壳单元厚度定义的信息。在 RADIOSS Block Format 文件格式中，该参数是通过 20 个字节宽的固定栏位进行定义的。为了对该模型进行尺寸优化，需要使用 Templex 格式取代该栏位来定义设计变量。

（5）在 Edit 下拉菜单中，选择 Setup selector。

（6）在 Fields 一栏中填入 20，即 20 个字符宽。

（7）单击 OK 按钮。

（8）按住〈Ctrl〉键，在厚度字段单击鼠标左键，将高亮显示厚度字段的 20 个字符。

（9）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create design variable。

（10）在弹出窗口中填入以下内容：

Name: t1
Label: Upper part
Initial value: 1.0
Lower Bound: 0.5
Upper Bound: 2.0
Format: %20.5f

（11）单击 OK 按钮。通过以上的步骤，在输入模板中定义了第一个设计变量。该设计变量代表壳单元厚度，其初始值为 1.0，取值下限为 0.5，取值上限为 2.0，变量一共 20 个字符宽度。

第二个部件的厚度值应该与第一个部件协调变化。因此，在代表第二个部件厚度的 /PROP/SHELL 卡片中的相应位置采用类似的方法，将其厚度值用设计变量 t1 进行替代。

（12）使用类似的方式，定义设计变量 t2，其代表了模型中的下半部分的薄壁件厚度。同样的，要求部件 3 和部件 4 的厚度值协调变化，因此对部件 3 和部件 4 只需要赋同一个厚度值 t2 即可。完成后的文件如图 12-12 所示。

```
/PROP/SHELL/1
1
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0t1                  1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/2
2
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0t1                  1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/3
3
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0t2                  1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/4
4
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0t2                  1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 12-12　变量定义

（13）在 File 中选择 Export as，将完成了设计变量定义的模型输出为模板文件 boxbeam1.tpl。

（14）关闭 Create Template 面板。

STEP 02 在 HyperGraph 中查看基本的输入模板

（1）启动 HyperGraph。

（2）在 Select application 中选择 TextView。

（3）单击工具栏中的 Open Document 按钮。

（4）选取此前创建的模板文件 boxbeam1.tpl。

（5）单击 Open 按钮。

（6）在文件的首位置，可以看到两个设计变量 t1 和 t2 的定义信息：

```
{parameter(t1,"Upper part",1.0,0.5,2.0)}
{parameter(t2,"Lower part",1.0,0.5,2.0)}
```

（7）使用搜索功能，在模板文件中搜索关键字/PROP/SHELL，可以看到代表厚度信息的部分均已经被设计变量所取代，如图 12-13 所示。

```
/PROP/SHELL/1
1
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0{t1, %20.5f}                           1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/2
2
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0{t1, %20.5f}                           1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/3
3
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0{t2, %20.5f}                           1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/4
4
#   Ishell    Ismstr
         1         2
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0{t2, %20.5f}                           1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 12-13 查看参数化文件

（8）单击工具栏中的 Edit Text 按钮，TextView 将计算各个设计变量的初值，并在模板文件中使用初值取代设计变量 T1 和 T2 的位置。

（9）再次搜索关键字/PROP/SHELL，如图 12-14 所示。

```
/PROP/SHELL/1
1
#    Ishell    Ismstr
         1         2
#                  hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                    0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0                   1                   1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/2
2
#    Ishell    Ismstr
         1         2
#                  hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                    0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0                   1                   1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/3
3
#    Ishell    Ismstr
         1         2
#                  hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                    0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0                   1                   1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/PROP/SHELL/4
4
#    Ishell    Ismstr
         1         2
#                  hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                    0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         2         0                   1                   1                   0         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 12-14　变量初值

STEP 03 定义设计变量，并进行第一次求解

（1）单击 Add Study。
（2）选择 New。
（3）在用户界面中将弹出 Add Study 对话框。
（4）单击 OK 按钮，在用户界面右上角的 Study directory 中选择工作目录。
（5）单击 Next 按钮，进入 Create models 窗口。
（6）单击 Add Model。
（7）单击 OK 按钮，可以看到在列表中添加了一个新的模型。
（8）在右上角的选取工具中，选择 Template file。
（9）在工作目录下，选择此前创建的模板文件 boxbeam1.tpl。
（10）单击 Open 按钮。
（11）单击 Next 按钮，进入定义设计变量 Design Variables 对话框。
（12）检查设计变量上下限的设置情况。
（13）单击 Next 按钮，进入 Do nominal run 窗口。
（14）在 Solver input file 中，填入 boxbeam1_0000.rad; boxbeam1_0001.rad。这两个文件即用于递交给 RADIOSS 求解器的 Starter File 和 Engine file。
（15）在 Solver execution script 中，选择 RADIOSS。

（16）在求解器输入参数 Solver input arguments 中，除了$file，填入–both –noh3d，中间用空格隔开。这两个参数分别表示要求 RADIOSS 用 Starter 文件和 Engine 文件完成碰撞分析，以及在求解结束后不生成 h3d 结果文件。

（17）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮。HyperStudy 将驱动 RADIOSS 完成有限元分析，并在工作文件夹下创建名为 nom_run/m_1 的子文件夹。在子文件夹中将产生 boxbeam1T01 文件（时间历程文件，包括质量、应变能和支反力信息）。该文件将在优化阶段被调用。

（18）单击 Next 按钮，进入 Create responses 面板。

STEP 04 建立响应

（1）单击 Add Response。

（2）在 Lable 一栏输入 Energy，并单击 OK 按钮。

（3）类似的，创建名为 Force 和 Mass 的响应。

（4）选择 Energy。

（5）单击 Expr Builder，用户界面中将弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 窗口。

（6）在 Vectors 面板中，单击 Add 按钮，则 HyperStudy 会自动创建名为 Vector 1 的结果向量。该向量的内容需要继续定义。

（7）在 Vector resource file 一栏中，选择 boxbeam1T01 文件。

（8）按以下方式设置 Vector 1 ，将结果向量 Vector 1 指向模型内能。

Type: Global Variables

Request: Internal Energy

Component: MAG

（9）单击 Functions，则会弹出 Functions 列表。

（10）选择 max。

（11）单击 OK 按钮，则当前被选中的表达式为 max()，并将显示在 Expression 一栏中。Vector 1 依然处于高亮状态。

（12）单击 Apply 按钮，在 Expression 栏中调用该结果向量。

（13）选中 Evaluate response expression，表达式 max(v_1)的值将被模型求解历程中最大内能值 440.02 所取代。

（14）单击 OK 按钮。

（15）单击 Force。

（16）再次单击 Expr Builder。

（17）在 Vectors 面板下，单击 Add 按钮，名为 Vector 2 的第二个响应向量被添加到列表中。

（18）在 Vector resource file 中，选择 boxbeam1T01。

（19）将结果向量 Vector 2 进行如下设置，以获取 Z 方向支反力信息。

Type: Rigid Wall/Wall Force

Request: 1 RWALL 1
Component: FNZ

（20）单击 Functions。
（21）选择 max。
（22）单击 OK 按钮。Vector 2 应依然处于高亮状态。
（23）单击 Apply 按钮，则在 Expression 一栏中应出现 max(v_2)，作为另一个响应函数，需要在约束阶段对其进行约束。
（24）选中 Evaluate response expression，则表达式 max(v_2)将改变为 88.5002，即 T01 文件中提取的支反力的最大值。
（25）单击 OK 按钮。
（26）单击 Mass。
（27）再次单击 Expr Builder。
（28）在 Vectors 面板中，单击 Add 按钮，名为 Vector 3 的响应向量被添加到列表中。
（29）在 Vector resource file 中，选择包含结果质量信息的 boxbeam1T01 文件。
（30）按以下内容定义 Vector 3：

Type: Global Variables
Request: Mass
Component: MAG

（31）单击 Apply 按钮，在 v_3 后添加参数[0]以提取模型的初始质量。
（32）选中 Evaluate response expression，则表达式 v_3[0]应该被数值 25.4464 所取代。
（33）单击 OK 按钮。
到目前为止，完成了整个模型设置的工作。在此基础上，可以针对这个模型进行实验设计、优化和随机性分析。

STEP 05 进行优化研究

（1）选取 Create optimization。
（2）单击 Add Optimization。
（3）在用户界面的右上角，选择优化引擎：ARSM - Adaptive Response Surface Method。
（4）单击 Next 按钮，进入 Design Variables 对话框，可以查看设计变量的定义情况。
（5）单击 Next 按钮，进入 Define constraints 对话框。
（6）单击 Add constraint。
（7）单击 OK 按钮。
（8）在 Apply Constraint On 下拉菜单中，选择 Energy。
（9）Bound Type 选择>=，设置其取值下限为 450。
（10）再次单击 Add constraint。
（11）单击 OK 按钮。
（12）在 Apply Constraint On 下拉菜单中，选择 Force。

（13）Bound Type 选择<=，设置其取值上限为 75。
（14）单击 Next 按钮，进入 Define objective 对话框。
（15）单击 Add objective。
（16）单击 OK 按钮。
（17）在 Apply On 下拉菜单中选择 Mass。
（18）在 Objective 下拉菜单中选择 Minimize。其他的设计参数不需要进行改变。
（19）单击 Launch optimization，开始优化迭代。
（20）完成了优化迭代后，HyperStudy 进入 Post-processing 窗口。

STEP 06 查看迭代历程

（1）在工作文件夹下的 opt_1.hgres 文件中，包含了优化迭代历程的各类信息。在 HyperStudy 后处理界面下打开该文件，可以查看 Obj & Constr.，DV 以及 Responses 在整个迭代历程中其取值的变化情况。

（2）选中各个复选框，查看结果。

12.6 实例：碰撞分析的可靠性优化

本节将介绍如何在 HyperStudy 中进行可靠性优化。

在进行本节的练习之前，首先需要完成 12.5 节的实例并保证该练习的模型依然处于打开状态，或者打开保存的 HyperStudy 文件。

在 12.5 节的实例中，优化的目标是在满足两条设计约束（模型内能小于 450，支反力小于 75）的前提下，最小化模型的质量。设计变量为原始模型薄壁结构 4 部分的厚度。厚度信息在 boxbeam1_0000.rad 文件中，通过关键字 PROP/SHELL 进行定义。由于模型上/下两部分的厚度是分别协调变化的，因此将模型上半部分的两个部件中的厚度参数合并为一个设计变量，而将模型下半部分的两个部件的厚度参数合并为另外一个设计变量。两个设计变量的初值均为 1.0，其厚度可以在 0.5～2.0 之间连续变化。

在这一节，在原有优化分析的基础上增加了可靠性分析的内容，包括设计变量取值的随机性，以及最终优化结果满足设计约束的概率。

壳单元的厚度服从期望为 1.0，方差为 0.10 的正态分布。

设计约束的表示如下：

Prob(internal energy > 450) > 0.98
Prob(reaction force < 75) > 0.98

以支反力为例，上式表示在考虑设计变量不确定性的情况下，希望支反力小于 75Nd 的概率大于 98%。

在这一节，使用 ARSM-SORA 优化引擎进行优化。SORA（Sequential Optimization and Reliability Assessment）是一种考虑设计变量随机性和约束可靠性目标的优化方法。ARSM-SORA 方法则是在 SORA 方法的基础上，通过建立响应面以降低此类问题的计算成本。

STEP 01 完成 HS-1060 中的练习

（1）启动 HyperStudy。

（2）完成练习 HS-1060 中的所有内容。

STEP 02 进行可靠性优化

（1）选取 Create optimization。

（2）单击 Add optimization，然后单击 OK 按钮。

（3）在用户界面的右上角，选择 Optimization Engine: (SORA-ARSM) - ARSM based SORA。

（4）单击 Next 按钮，进入 Design Variables 对话框。用户可以在这里查看设计变量的定义情况。

（5）在 Variable Type 后面的 variable 1 中，选择 Random Design。

（6）在右侧的面板中的 Deterministic 页面下，查看 nominal value (1.0), lower bound (0.5) 以及 upper bound (2.0)。

（7）在 Random 页面下，设置 Variance 为 0.01。

通过上面的步骤定义，完成了设计变量的正态分布定义。

（8）重复步骤（4）～（7）的工作来定义变量 2。

（9）单击 Next 按钮，进入 Define constraints 对话框。

（10）单击 Add constraint。

（11）单击 OK 按钮。

（12）在 Type 下拉菜单中，选择 Random。

（13）在 Apply Constraint On 下拉菜单中，选择 Energy。

（14）Bound Type 选择 >= ，设置其下限为 450。

（15）在 CDF Limit 栏中填入 0.98，即在优化迭代的过程中，模型内能大于 450 的概率不能小于 0.98。

（16）再次单击 Add constraint。

（17）单击 OK 按钮。

（18）在 Type 下拉菜单中，选择 Random。

（19）在 Apply Constraint On 下拉菜单中，选择 Force。

（20）Bound Type 选择<=，设置其上限为 75。

（21）在 CDF Limit 栏中填入 0.98。

（22）单击 Next 按钮，进入 Define objective 对话框。

（23）单击 Add objective。

（24）单击 OK 按钮。

（25）在 Apply On 下拉菜单中，选择 Mass。

（26）在 Objective 下拉菜单中，选择 Minimize。

（27）在 Basic Parameters 面板中，设置 Constraint Violation Tolerance 为 0.5%，其他优化设计参数不需要改变。

（28）单击 Launch optimization，HyperStudy 将在优化迭代开始后，自动切换到 Post-processing 窗口中。

STEP 03 查看优化迭代历程

（1）在优化迭代结束后，文件 opt_1.hgres 将会被自动装载到 Optimization results plot file 中。

（2）每一栏，分别代表了 Obj & Constr.，DV 和 Responses。

（3）如果用户使用的优化引擎为 SORA 或者 ARSM-SORA，那么在结果后处理中，将在 Random Types 中附加额外的信息，包括标识为（labeled “_PV”）的概率信息。该计算结果与参数 CDF Limits 的设置直接相关。

针对设计约束 Prob(g > b) > R，如果 g 的 R 百分数值大于 b，则该约束在 R 的概率下得以满足。R 为目标概率，b 为约束下限。

针对设计约束 Prob(g < b) > R，如果 g 的 R 百分数值小于 b，则该约束在 R 的概率下得以满足。

（4）优化迭代结果显示如图 12-15。

Optimization Iteration History Plot | Optimization Iteration History Table

Iteration	Objective_1	Constraint_1	Constraint_2	Upper part	Lower part	Energy	Force	Mass	Constraint...	Constraint...
1	25.473381	450.62128	75.025169	1.0249392	1.0915549	450.62128	75.025169	25.473381	381.51093	99.382683
2	25.517504	736.06403	60.642029	1.2424249	1.0859823	736.06403	60.642029	25.517504	666.95367	75.493889
3	25.506058	578.93011	59.031963	1.3115246	0.9769677	578.93011	59.031963	25.506058	578.93011	72.941963
4	25.495329	452.94635	58.626232	1.3245421	0.9203330	452.94635	58.626232	25.495329	452.94635	76.867493
5	25.495226	452.32443	58.661301	1.3236892	0.9206419	452.32443	58.661301	25.495226	452.32443	76.558456

图 12-15　优化迭代结果

从图 12-15 中可以看到两个设计约束均满足置信度要求：constraint_2_PV = 74.752 表示约束 2 的取值小于 75.0 的概率满足 98%的要求。

12.7　实例：多学科优化研究

本实例将演示如何使用 HyperStudy 进行多学科尺寸优化。优化研究的模型为使用 RADIOSS Bulk 建立的平板有限元分析模型，如图 12-16 所示。可以在路径<install_directory>/tutorials/hst/Multi/ 下找到相应文件，并将这些文件复制至工作文件夹中。

✓ plate1.tpl Base input template model 1.

✓ plate2.tpl Base input template model 2.

优化问题是在满足应力约束和频率约束的前提下，最小化模型的质量。设计变量为该平板结构中 3 部分板壳结构的厚度，3 处厚度信息在 RADIOSS Bulk 中是通过 PSHELL 卡片进行设置的。3 部分板壳结构的初始厚度均为 0.1，其厚度可以在 0.05～0.15 之间变化（即设计变量取值范围为 0.05～0.15）。优化类型为尺寸优化。为了演示如何使用 HyperStudy 驱动求解器完成多学科优化的工作，在本节的实例中建立了两个有限元模型，其中一个用于应力分

析，而另一个则用于模态分析。两个模型拥有完全相同的设计变量。

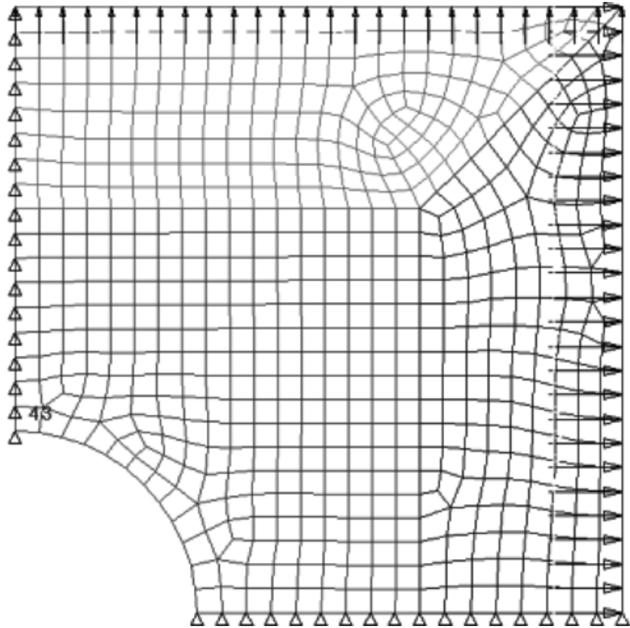


图 12-16　平板结构 1/4 模型

STEP 01 在 HyperGraph 中查看基本的输入模板

（1）启动 HyperGraph。

（2）在 Select application 中选择 TextView。

（3）在工具栏中选择 Open File。

（4）在工作目录下选择文件 plate1.tpl，该输入模板用于进行应力分析。

（5）单击 Open 按钮。

（6）可以看到，在该文件的首部分定义了 3 个设计变量：

```
{parameter(TH1,"Property 11",.1,.05,.15)}
{parameter(TH2,"Property 12",.1,.05,.15)}
{parameter(TH3,"Property 13",.1,.05,.15)}
```

如果在该文本中搜索关键字 PSHELL，可以看到编号为 2、3、4 的 3 个 PSHELL 卡片中所有的厚度信息，都已经被文件首部分所定义的设计变量所取代了。

```
$    PSHELL Data
$
PSHELL          2          2{TH1,%8.5f}          2    1.0          20.8333330.0
PSHELL          3          2{TH2,%8.5f}          2    1.0          20.8333330.0
PSHELL          4          2{TH3,%8.5f}          2    1.0          20.8333330.0
```

（7）使用类似的方式打开文件 plate2.tpl，并查看设计变量定义的情况。该输入模板用于

定义模态分析。

STEP 02 开始创建 study

（1）在 HyperGraph 菜单栏中选择 Applications 下拉菜单。
（2）选择 HyperStudy，在用户界面中将弹出 Create studies 窗口。

STEP 03 进行基本设置

（1）单击 Add Study。
（2）选择 New，用户界面中将弹出 Add Study 对话框。
（3）单击 OK 按钮。
（4）将工作目录设置为 Study directory。
（5）单击 Next 按钮，进入 Create models 窗口。
（6）单击 Add Model。
（7）单击 OK 按钮，新建的模型 Model_1 被添加到列表中。
（8）在视窗的右上角选择 Template file。
（9）在工作文件夹下选择 plate1.tpl 文件。该文件用于线性静力分析。
（10）单击 Open 按钮。
（11）单击 Add Model。
（12）单击 OK 按钮，新建的模型 Model_2 被添加到列表中。
（13）在视窗的右上角选择 Template file。
（14）在工作文件夹下选择 plate2.tpl 文件。该文件用于模态分析。
（15）单击 Open 按钮。
（16）单击 Next 按钮，进入定义设计变量 Design Variables 对话框。
（17）查看设计变量的上下限取值。
（18）单击 Next 按钮，进入 Do nominal run 窗口。
（19）在 Solver input file 栏目中，分别填入 plate1.fem 和 plate2.fem。
（20）在下拉菜单 Solver execution script 中选择求解器 RADIOSS，在后续的求解和优化过程中，HyperStudy 将驱动 RADIOSS，求解模型 plate1.fem 和 plate2.fem。不需要对其他参数进行修改。

STEP 04 进行基本求解

单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，则在工作文件夹下，HyperStudy 会在 nom_run 下建立名为 m_1 和 m_2 的子文件夹。这两个文件夹中分别包括模型 plate1.fem（进行应力分析的求解结果）和模型 plate2.fem（进行模态分析的求解结果）。其中，文件 plate2.out 包含结构体积以及固有频率的相关信息，而文件 plate1.h3d 则包含应力分析结果的相关特征。这

两个文件及其相关内容将在优化阶段被调用。

STEP 05 建立响应

（1）单击 Next 按钮，进入 Create responses 窗口。

（2）单击 Add Response，填入 Volume。

（3）单击 OK 按钮。

重复第一步至第三步的内容，依次创建名为 Stress43 和 Frequency1 的两个响应。

（4）双击 Volume。

（5）在用户界面中将弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 窗口。

（6）在 Vectors 面板中，单击 Add 按钮。

（7）则将自动创建名为 Vector 1 的向量。

（8）在 Vector resource file 一栏的下方，选取目录 nom_run/m_2，选择在上步基本求解中生成的 Plate2.out 文件。

（9）定义 Vector 1 为板壳的体积。在 Vectors 标签右下角的下拉菜单中，按以下内容设置 Vector 1 的相关参数。

Type: Volume

Request: Volume

Component: Value

（10）单击 Apply 按钮，添加该向量至表达式窗口。由于该向量中仅有一个值，单击 Apply 按钮后，会在表达式窗口中自动创建向量值 v_1[0]。

（11）选中 Evaluate response expression，则表达式 v_1[0]应该被数字 232.384（该平板件的体积值）所取代。

（12）单击 OK 按钮。

STEP 06 定义第二个响应

（1）双击 Stress43。

（2）在 Vectors 面板中，单击 Add 按钮。

（3）则会创建名为 Vector 2 的结果向量。在 Vector resource file 中，将向量 Vector 2 指向路径 nom_run/m_1 下的结果文件 plate1.h3d。

（4）按以下内容定义向量 Vector 2，该向量指向单元编号 43 的 Von Mises Stress 结果。

Subcase: Subcase 1 - Load
Type: Element Stresses (2D)
Request: E43
Component: vonMises (Mid)

（5）单击 Apply 按钮，添加该向量至表达式窗口。由于该向量中仅有一个值，单击 Apply 按钮后，会在表达式窗口中自动创建向量值 v_2[0]。

（6）选中 Evaluate response expression，表达式 v_2[0]将被数值 26.6559（即单元编号 43 处的应力结果）所取代。

（7）单击 OK 按钮。

STEP 07 定义第三个响应

（1）双击 Frequency1。

（2）在 Vectors 面板中，单击 Add 按钮，定义第三个表示频率的向量，添加名为 Vector 3 的向量。

（3）在 Vector resource file 中，选择路径 nom_run/m_2 下的结果文件 plate2.out。该文件包含了模型 plate2.fem 的固有频率信息。

（4）按以下内容定义 Vector 3，将该向量指向该模型的第一阶固有频率。

Type: Frequency
Request: Mode 1
Component: Value

（5）单击 Apply 按钮，在表达式一栏中添加向量 Vector 3。

（6）频率保存在向量中。要选择第一阶固有频率，需在 v_3 后加上[0]。

（7）选中 Evaluate response expression，表达式 v_3[0]将被频率值 31.3943 取代。

（8）单击 OK 按钮。

到这一步，模型的设置即告结束。在后续的工作中，可以在该模型的基础上进行实验设计、优化及随机性分析等研究内容。

STEP 08 在两个模型的设计变量间建立映射关系

（1）单击 Next 按钮，进入 Link design variables 窗口。

（2）双击设计变量 Property 21。

（3）双击设计变量 Property 11，则 HyperStudy 会在模型 1 的设计变量 Property 11 和模型 2 的设计变量 Property 21 间建立映射关系。其中，设计变量 Property 11 作为独立设计变量，将被用于优化设计。而设计变量 Property 21 的取值将随 Property 11 的变化而变化。

（4）单击 OK 按钮。

重复以上步骤，分别在设计变量 Property 22 和 Property 12 之间，以及设计变量 Property 23 和 Property 13 之间建立映射关系。

STEP 09 进行优化设计

（1）选取 Create optimization study。

（2）单击 Add Optimization。

（3）在视窗的右上角，选择优化引擎为 Optimization Engine: (ARSM) - Adaptive Response

Surface Method。

（4）单击 Next 按钮，进入 Design Variables 对话框。在这一步，可以再次查看设计变量的取值范围等相关信息。

（5）单击 Next 按钮，进入 Define constraints 对话框。

（6）单击 Add constraint。

（7）单击 OK 按钮。

（8）在下拉菜单 Apply Constraint On 中，选择响应 Stress43。

（9）Bound Type 选择<= ，设置其上限值为 22。

（10）再次单击 Add constraint。

（11）单击 OK 按钮，在下拉菜单 Apply Constraint On 中，选择响应 Frequency1。

（12）Bound Type 选择>=，设置其下限为 32。

（13）单击 Next 按钮，进入 Define objective 对话框。

（14）单击 Add objective。

（15）单击 OK 按钮。

（16）在 Apply On 下拉菜单中选择 Volume。

（17）在 Objective 下拉菜单中，选择 Minimize。其他优化参数则不需要用户修改。

（18）单击 Launch optimization，开始优化迭代。

（19）优化迭代收敛后，单击 Next 按钮进入 Post-processing 窗口。

STEP 10 查看优化迭代历程

（1）在 Optimization results plot file 中，选择 opt_1.hgres 文件。

（2）单击 Open 按钮打开该文件，包括 Obj & Constr., DV 以及 Responses 等相关信息都可以在该文件中进行查看。

（3）选中并查看设计变量、目标函数等各个项目的迭代历程。

图 12-17 给出了目标函数及约束在优化迭代历程中的取值变化情况。

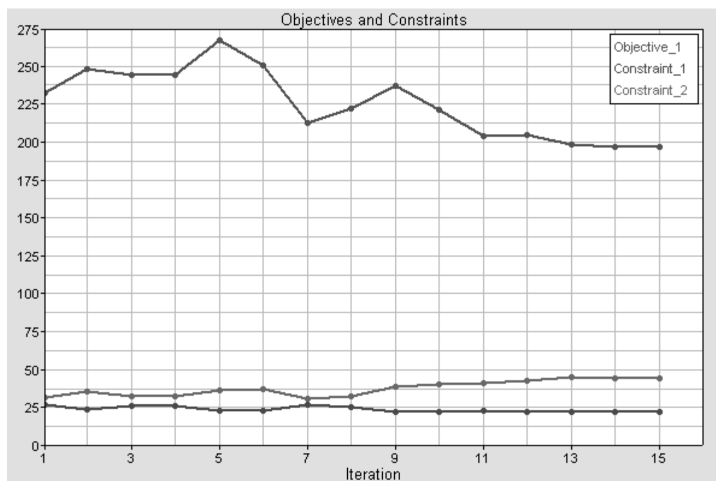


图 12-17　目标函数和约束的变化

12.8 小结

通过本章的练习，读者应该了解并掌握以下知识点：

✓ 基于 Templex 模板技术的 HyperStudy 建模方法。
✓ 从 HyperMesh 中直接提取设计变量建模，并与 HyperMesh 实时互换数据。
✓ 在一个 Study 文件中建立多个模型，并通过表达式关联多个模型的设计变量。
✓ 通过 HyperStudy 调用多种求解器。
✓ 建立简单的响应。
✓ 了解如何进行简单的试验设计和对零件尺寸的单目标优化。
✓ 了解如何建立可靠性设计优化。

第 13 章

HyperMath 集成优化技术实例



HyperMath 是 Altair 开发的一个通用的数值计算环境，使客户方便地开发和执行定制的数值操作于不同的数据类型，包括与 CAE 前后处理相关联的数据。这一新的软件技术包含一个强大、灵活的编程语言，全面的数学和工具库，集成的代码开发环境，数据可视化和通用数据格式的直接支持。HyperMath 无缝地与设计优化包和流程自动化工具集成，而且也以命令行方式支持第三方的应用软件，提供快速的设计方向和改进的决策制定。

HyperMath 同 HyperStudy 进行集成，可最大程度扩展 HyperStudy 的应用领域。HyperStudy 用户可以开发自己的 HyperMath 函数库，用来仿真求解或构造响应。本章将通过实例为读者介绍两种调用 HyperMath 函数的应用方法：

- ✓ 将 HyperMath 作为求解器调用并输出计算结果。
- ✓ 注册 HyperMath 函数并使用该函数构建响应。

本章重点知识

13.1　实例：在 HyperStudy 中调用 HyperMath 求解器进行优化
13.2　实例：在 HyperStudy 中注册 HyperMath 函数进行优化
13.3　小结

13.1　实例：在 HyperStudy 中调用 HyperMath 求解器进行优化

本实例将演示在一个二维 Rosenbrock 函数上搜索最小值，HyperMath 作求解器，而 HyperMath 函数（记录在脚本文件.hml 中）作数学模型。

本实例中分别定义两个变量：x 和 y。目标是将 $f(x,y)=100(y-x^2)^2+(1-x)^2$ 最小化。x 和 y 的取值范围都为[−2 ; 2]，初始值分别为 1.2 和 1.1。

STEP 01 建立模型

（1）从开始菜单的 Altair HyperWorks 程序组，启动 HyperMath 并新建一个 HML 文件，如图 13−1 所示。

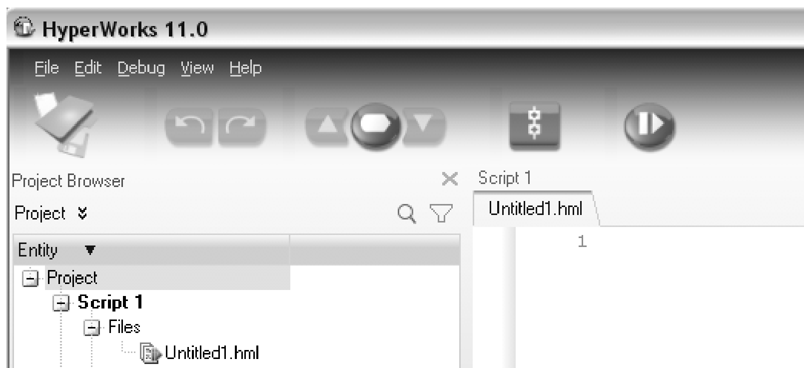


图 13−1　新建 HML 文件窗口

（2）在 Untitled1.hml 脚本编辑区域中输入以下 HyperMath 命令：

```
x = 1.20000 //为 x 赋值
y = 1.10000//为 y 赋值
f = 100.*(y-x^2)^2 + (1-x)^2        //定义 f 为一个二维 Rosenbrock 函数
g = 100.*(x-y^1/2)^1/2      //定义 g 为任意其他函数（函数 g 不在本次优化中使用）
outfile = "hmath_3_100.res"; //定义结果输出文件
fid = io.open(outfile,'w'); //打开结果输出文件
fid::write(f, '\n'); //写入函数 f 的返回值
fid::write(g, '\n'); //写入函数 g 的返回值
fid::close(); //关闭结果输出文件
```

（3）将 HyperMath 脚本文件保存为 HMath_3_100.hml。

（4）退出 HyperMath。

STEP 02 模型参数化

（1）启动 HyperStudy。

（2）在 Utilities 下拉菜单中选择 Editor，从而启动 HyperStudy Editor。

（3）在 HyperStudy Editor 的 File 下拉菜单中选择 Open 命令打开 HyperMath 脚本文件 HMath_3_100.hml，如图 13-2 所示。

（4）按以下步骤定义变量 *x* 和 *y*。

1）高亮 x 后边的字段 1.20000。

2）单击鼠标右键，选择 Create Design Variable，如图 13-3 所示。

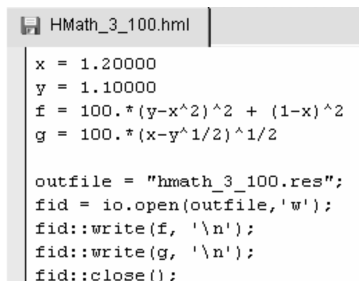


图 13-2　HyperStudy Editor 窗口

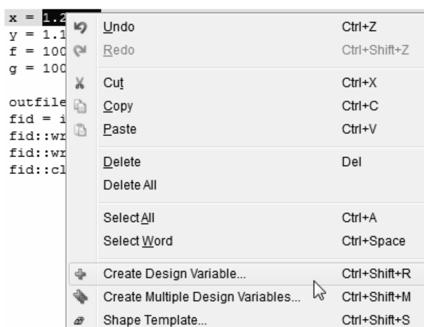


图 13-3　激活设计变量选项

3）定义变量 *x* 的属性，如图 13-4 所示。

4）重复以上步骤定义变量 *y* 的属性，如图 13-5 所示。

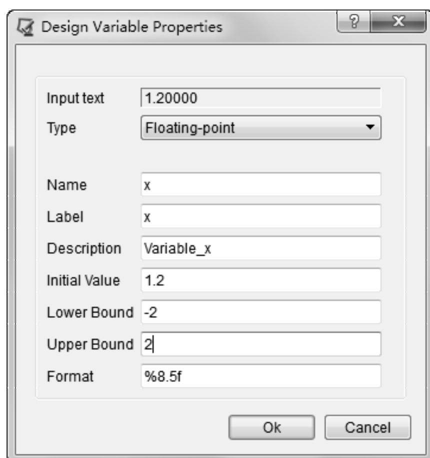


图 13-4　定义变量 *x* 的属性

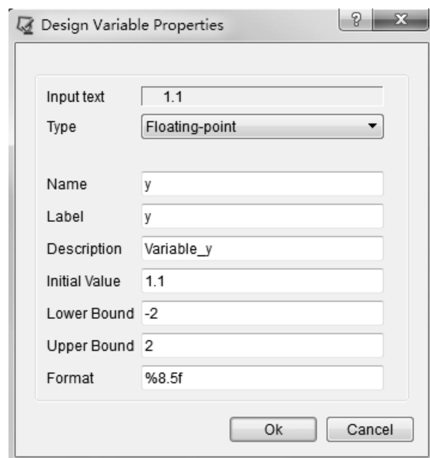


图 13-5　定义变量 *y* 的属性

（5）在工具栏上单击按钮（Show / Generate Templex）创建 template 文件。

（6）把该 template 文件保存为 HMath_3_100.tpl。如果打开这个 template 文件，将观察到如下格式：

```
{parameter(x, "x", 1.2, -2, 2) 'variable_x}
{parameter(y, "y", 1.1, -2, 2) 'Variable y}
x = {x, %8.5f}
y = {y, %8.5f}
```

```
f = 100.*(y-x^2)^2 + (1-x)^2
g = 100.*(x-y^1/2)^1/2
outfile = "hmath_3_100.res";
fid = io.open(outfile,'w');
fid::write(f, '\n');
fid::write(g, '\n');
fid::close();
```

（7）退出 HyperStudy Editor。

STEP 03 导入参数化模型

（1）单击 Add study 并选择 New 来显示 Add Study 对话框。
（2）单击 OK 按钮接受默认的 Study 文件标签和变量名。
（3）在 Study directory 中定义工作目录，建议将 STEP 02 中创建的 template 文件放入该工作目录。
（4）单击 Next 按钮进入 Create models 面板来定义模型。
（5）单击 Add model 并选择 Model type 为 Template。
（6）单击 OK 按钮，一个新模型就成功加入了。
（7）单击文件浏览按钮选择 Template 文件。
（8）从工作目录中打开 Hmath_3_100.tpl。
（9）单击 Next 按钮进入 Create design variables 面板来定义/导入变量。
注意：在 template 文件中定义的变量已经被 HyperStudy 自动识别。
（10）检查变量的上/下限和初始值，如图 13-6 所示。

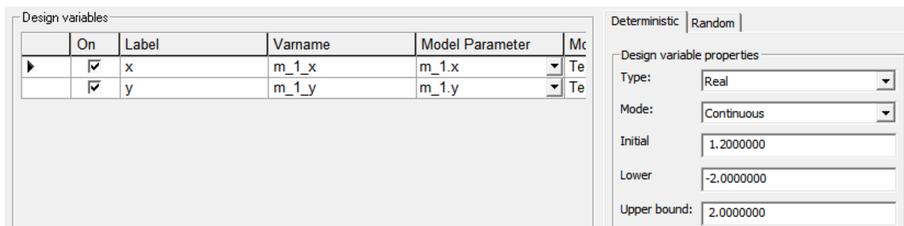


图 13-6 设计变量窗口

（11）单击 Next 按钮进入 Do nominal run 面板来定义求解器和输入/输出参数。
（12）在 Solver input file 区域中输入 Hmath_3_100.hml。
（13）从 Solver execution script 下拉列表中选择 HyperMath。
注意：在 Solver input arguments 区域中输入 -f $file （该选项将使 HyperMath 在后台运行），如图 13-7 所示。

Model	Solver input file	Solver execution script	Solver input arguments
Model_1	Hmath_3_100.hml	HyperMath	-f $file

图 13-7 定义求解器与输入/输出参数

STEP 04 求解问题

（1）依次单击 Write 及 Execute 按钮或直接单击 Write/Execute 按钮。

这样，HyperStudy 就会在工作目录中创建 nom_run/m_1 文件夹来保存结果输出文件 hmath_3_100.res。

（2）单击 Next 按钮进入 Create responses 面板来定义响应。

STEP 05 定义响应

（1）单击 Add Response 按钮。

（2）单击 OK 按钮。

（3）选择 Response_1。

（4）单击右上方的 Expr Builder 按钮，将弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 对话框。

（5）在 Vectors 标签栏中，单击 Add 按钮来创建向量 Vector1。

（6）在 Vector resource file 区域中选择 hmath_3_100.res 文件。

（7）这样，向量 Vector1 就包含了 f、g 两个分量，它们分别为{11.6, 32.5}。

（8）单击 Apply 来引用向量 Vector1。

（9）在 Response expression 区域中跟着 v_1 输入 [0]，这样 v_1[0]就指向了第一个分量，也就是 Rosenbrock 函数 f。

（10）选中 Evaluate expression 选项来解析表达式。

（11）表达式 v_1[0] 转变为其代表的数值 11.6。

（12）单击 OK 按钮。

这样就完成了问题初始化（导入模型、求解问题、定义响应）。在此基础上可以进行下一步的分析（如试验设计、优化和随机分析）。

STEP 06 优化问题

（1）在左边的树状浏览器中单击 Create optimization study 节点，进入 Create optimization study 面板。

（2）单击 Add optimization 并单击 OK 按钮来创建一个新的优化问题。

（3）在右上方的 Optimization Engine 下拉列表中选择优化引擎 (ARSM) - Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮进入 Define design variables 面板。在这里，观察并调整变量的属性。

（5）单击 Next 按钮进入 Constraints 面板。

（6）对于当前的优化问题无需约束，所以直接单击 Next 按钮进入 Objectives 面板。

（7）单击 Add Objective 添加一个目标。

（8）单击 OK 按钮。

（9）从 Apply On 下拉列表中选择 Response_1。

（10）从 Objective 下拉列表中选择 Minimize。

在这个优化问题上使用优化引擎的默认参数直接求解优化问题。

（11）单击 Launch Optimization 按钮开始求解优化问题。

（12）当优化完毕后单击 Next 按钮进入 Post processing 面板。

Optimization results plot file (opt_1.hgres) 把迭代过程绘制在二维图表中。

选择相应的标签页（Obj. & Constr., DV, 和 Resp.）并选中这些响应的复选框，图表中即显示其相应的迭代历史，如图 13-8 所示。

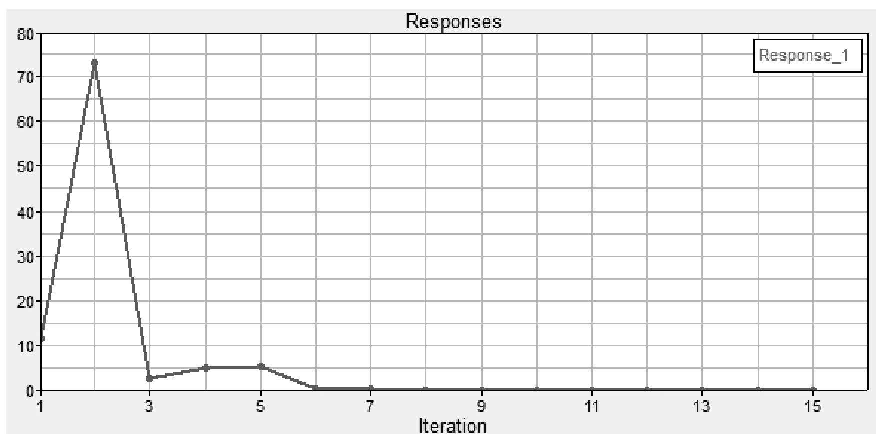


图 13-8　优化迭代历程曲线

13.2　实例：在 HyperStudy 中注册 HyperMath 函数进行优化

本实例通过 Preference 文件（.mvw）将一个定义在 HyperMath 脚本中的 Rosenbrock 函数注册到 HyperStudy 中供其调用来解析响应。

本实例中分别定义两个变量：x 和 y。目标是将 $f(x,y)=100(y-x^2)^2+(1-x)^2$ 最小化。x 和 y 的取值范围都为[−2 ; 2]，初始值都为[−1.0 ; −1.0]。

STEP 01　创建待注册函数

（1）启动 HyperMath。

（2）新建一个 HML 脚本文件，如图 13-9 所示。

（3）在 Untitled1.hml 脚本编辑区域内输入如下 HyperMath 命令：

```
function ros_eval(x,y) {                    //开始定义二维 Rosenbrock 函数
 f = 100.*(y-x^2)^2 + (1-x)^2               //计算二维 Rosenbrock 函数值 f
   return(f)                                //返回 f
}                                           //结束函数定义
```



图 13-9　新建 HML 脚本文件

（4）将该 HyperMath 脚本文件保存为 ros_function.hml。

（5）退出 HyperMath。

STEP 02 在 Preference 文件中加入待注册函数

（1）新建一个文本文件，并保存为 HML_prefs.mvw，将在其中定义 Preference 指令。

（2）编辑 HML_prefs.mvw preference 文件，并加入以下指令：

```
*Id("HyperStudy v11.0")
*BeginDefaults()
  *BeginPlotDefaults()
      *RegisterHMATHFunction("ros_eval", "<path>/ros_function.hml", 2)
  *EndPlotDefaults()
*EndDefaults()
```

在此，<path>代表 hml 文件保存的完整路径。

STEP 03 创建问题和模型

（1）启动 HyperStudy。

（2）在 File 下拉菜单中选择 Set Preferences File，进而选择 HML_prefs.mvw，这样就完成了函数的注册。

（3）单击 Add study 并选择 New 来显示 Add Study 对话框。

（4）单击 OK 按钮，接受默认的 Label 和 Variable 名称，这样就新建了一个问题（Study）。

（5）在 Study directory 区域中定义当前 Study 的工作目录。

（6）单击 Next 按钮进入 Create models 面板来创建模型。

（7）单击 Add model 并在 Model type 中选择 HyperStudy。

（8）单击 OK 按钮。

这样就完成了问题和模型的创建。由于本节的重点在于使用注册的 HyperMath 函数解析响应，所以使用 HyperStudy 类型的模型省去了定义外部模型文件和外部求解器的过程。

STEP 04 创建变量与响应

（1）单击 Next 按钮进入 Create design variables 面板，开始定义变量。

（2）添加两个变量，分别为 X 和 Y。它们的初始值都为−1.0，取值范围都为[−2.0;2.0]。

（3）单击 Next 按钮并跳过 Execute Nominal Run 面板（因为 HyperStudy 类型的模型无需外部求解器参与求解模型）。

（4）单击 Next 按钮进入 Create responses 面板，开始定义响应。

（5）单击 Add Response。

（6）单击 OK 按钮完成 Response_1 的创建。

（7）单击 Response_1。

（8）单击右上方的 Expr Builder 按钮，弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 对话框。

（9）单击 Functions 并选择 ros_eval。

注意：ros_eval 函数就是先前注册的 HyperMath 函数。

（10）在 Response expression 区域中输入 ros_eval(*x*,*y*)表达式。

注意：*x* 和 *y* 是先前定义的变量名。

（11）选中 Evaluate expression 选项就可以读出表达式的值：404。

（12）单击 OK 按钮。

这样就完成了问题的初始化（注册函数、定义模型类型、定义变量、定义响应）。在此基础上可以进行下一步的分析（如试验设计、优化和随机分析）。

STEP 05 优化问题

（1）在左边的树状浏览器中单击 Create optimization study 节点，进入 Create optimization study 面板。

（2）单击 Add optimization 并单击 OK 按钮创建一个新的优化问题。

（3）在右上方的 Optimization Engine 下拉列表中选择优化引擎 (ARSM) - Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮进入 Define design variables 面板。在这里，观察并调整变量的属性。

（5）单击 Next 按钮进入 Constraints 面板。

（6）对于当前的优化问题无需约束，所以直接单击 Next 按钮进入 Objectives 面板。

（7）单击 Add Objective 添加一个目标。

（8）单击 OK 按钮。

（9）从 Apply On 下拉列表中选择 Response_1。

（10）从 Objective 下拉列表中选择 Minimize。

在这个优化问题上使用优化引擎的默认参数直接求解优化问题。

（11）单击 Launch Optimization 按钮开始求解优化问题。

（12）当优化完毕后单击 Next 按钮进入 Post processing 面板。

Optimization results plot file (opt_1.hgres)把迭代过程绘制在二维图表中。

选择相应的标签页（Obj. & Constr., DV, 和 Resp.）并选中这些响应的复选框，图 13-10 显示其相应的迭代历史。

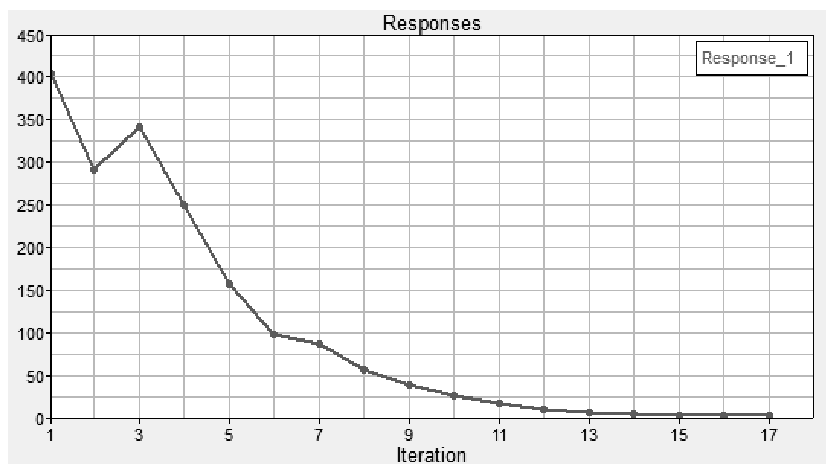


图 13-10　优化迭代历程曲线

13.3　小结

通过本章的两个例子，读者应该掌握以下知识点：

✓ 结合 Templex 技术建立基于 HML 脚本文件的模型，通过调用 HyperMath 求解器的方式执行 HyperMath 函数。

✓ 通过注册 HMATHFunction 的方式调用 HyperMath 函数构建响应。

HyperMath 是一个类似于 MatLab 的工具包，广泛应用于 HyperWorks 各模块的二次开发，读者如果熟练掌握该工具包，则可以大大拓展 HyperStudy 的应用范围和功能。各行业有各自的工程计算方法，如果采用 HyperMath 进行编程并同 HyperStudy 集成，则可进行该类工程问题的基于工程算法的优化研究。

第 14 章



Excel 集成优化技术实例

Excel 表格在工程计算中被广泛使用。从概念设计、数据记录、公式计算到后期汇总都可以通过 Excel 实现。作为一个开放的多学科分析和优化的平台，HyperStudy 提供读/写 Excel 表格中的数据的功能，实现基于 Excel 表格模型的分析与优化。由于通常情况下 Excel 表格计算快速，HyperStudy 通过 Excel 可以在较短时间内完成较多设计点的计算，带来的好处是更充分的采样。HyperStudy 与 Excel 的集成应用大体分两类：

- 从静态的 Excel 数据记录中提取变量与响应值，生成拟合模型，再基于拟合模型做分析和优化。
- 直接在 Excel 表格中定义变量与响应。通过驱动变量、更新响应，形成数据的实时关联。

本章将通过实例演示上述两种集成应用，帮助读者掌握 HyperStudy 与 Excel 集成应用的建模以及相应的分析与优化技术。

本章重点知识

14.1　实例：提取 Excel 表格数据进行研究
14.2　实例：关联 Excel 表格数据进行优化设计
14.3　实例：基于 Excel 表格进行多目标优化
14.4　实例：起落架支撑梁的尺寸优化
14.5　小结

14.1 实例：提取 Excel 表格数据进行研究

本实例将演示如何提取 Excel 表格数据进行拟合和优化研究。将目录<install_directory>/tutorials/hst/Excel/中的 Excel 文件 study.xls 复制到工作目录。表格有 5 列，第一列是设计的序号，第二、三列的值是每个设计的两个设计变量。第四、五列是之前运行的实验设计的结果，共有 16 个设计。

STEP 01 创建 HyperStudy 的执行输入

（1）打开 Excel 表。
（2）检查表中的设计变量和设计响应信息。
（3）另存表格为文本文件 study.txt。

STEP 02 建立 Study

（1）打开 HyperStudy。
（2）单击 Add Study。
（3）选择 New。
（4）单击 OK 按钮。
（5）通过窗口右上角的文件浏览按钮选择工作目录作为 Study directory。
（6）单击 Next 按钮进入 Create models 窗口。
（7）单击 Add model。
（8）从下拉列表中选择 Model type: HyperStudy。
（9）单击 OK 按钮，Model_1 加入了列表。
（10）单击 Next 按钮进入 Create design variables 窗口。
（11）单击 Add Design Variable。
（12）单击 Apply 按钮两次。
（13）单击 Apply 按钮。
此时，已经为研究创建了两个设计变量。
（14）单击 Next 按钮进入 Do nominal run 窗口。

STEP 03 创建响应

（1）单击 Next 按钮进入 Create responses 窗口。
（2）单击 Add Response。
（3）单击 Apply 按钮 3 次创建 3 个响应。
（4）单击 Cancel 按钮。
（5）单击选中 Response_1 后，单击鼠标右键。

（6）将其改名为 Index。

（7）此响应作为设计的计数器。

（8）按 Enter 键。

（9）在 Response expression 区域中写下或者复制如下内容：

Convert (getenv ("STUDY_RUN_NUMBER"))-1。

环境变量 STUDY_RUN_NUMBER 返回当前运行的 DOE 的环境变量数字。在 Study setup 中其值为 1。HyperStudy 计数从 0 开始，因此需要减 1。

（10）双击 Response_2，将弹出 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口出现。

（11）在 Vectors 面板中单击 Add 按钮。

（12）加入 Vector 1。

（13）选择 Vector resource file，通过 Browse 选择 study.txt，此时出现源文件的文件警告信息。

（14）选择 Vector file type: Reference file（这是警告信息的纠正）。

（15）通过下列选项定义 Vector 1 作为表格中第四列的值。

Type：Unknown

Request：Block 1

Component：Column 4

（16）单击 Apply 按钮在表达式区域运用此向量。因为名为 r_1 的设计变量计数器 Index 已经定义，这将为每个设计提取响应。

（17）编辑 Response expression 并输入 v_1 [r_1]。

（18）单击 Evaluate response expression，表达式 v_1[r_1] 应该改为 8.01742。

（19）单击 OK 按钮。

（20）双击 Response_3。

（21）在 Vectors 面板中单击 Add 按钮，名为 Vector 2 的结果向量加入。

（22）选择 Vector resource file，通过 Browse 选择 study.txt。

（23）选择 Vector file type Reference file。

（24）通过下列选项定义 Vector 2 作为表格第五列的值。

Type：Unknown

Request：Block 1

Component：Column 5

（25）单击 Apply 按钮，在表达式区域设置此向量。

因为名为 r_1 的设计变量计数器 Index 已经定义，这将为每个设计提取响应。

（26）编辑 Response expression 并输入 v_2 [r_1]。

（27）单击 Evaluate response expression，表达式 v_2 [r_1] 应该改为-1.50082。

（28）单击 OK 按钮。

STEP 04 从表格中输入 DOE 和结果

（1）在导航树中单击 Create DOE study 空白框。

（2）单击 Add DOE Study。

（3）从下拉菜单 Controlled factors, DOE Class 中选择 Run Matrix。

（4）利用文件浏览选择文件 study.txt。

（5）单击 Next 按钮进入 Controlled variables 对话框。

（6）单击 Next 按钮进入 Controlled interactions 对话框。所有界面为默认设置，不能编辑。

（7）单击 Next 按钮进入 Controlled allocations 对话框。此步设置连接设计变量与矩阵中的列。

（8）在右手侧，通过下拉列表改 Col 0 为 None，分配 dv_1 为矩阵第二列(Col 1)，分配 dv_2 为矩阵第三列(Col 2)。

（9）单击 Apply 按钮。

（10）单击 Next 按钮 3 次进入 Extract responses 对话框。

（11）单击>> Extract >>。

从表格中提取响应。

STEP 05 创建拟合

（1）在导航树中单击 Create approximation 空白框。在左侧列表中的每个响应创建了一个拟合。Index 是唯一的计数器不是因子。

（2）单击 Add 按钮。

（3）选择 Approximation Type: Moving Least Squares。

（4）确认 Add to all 复选框被选中。

（5）单击 OK 按钮。

（6）单击 Next 按钮。

（7）单击 Import Matrix 并选择 doe_1。

（8）单击 OK 按钮。

（9）进入 Build Approximation 面板，将发现每个响应已经有了一个一阶拟合。Response_1 仅为计数器并非为因子。另外两个响应需要拟合与优化。

在 Approximations 树中的 Response_2 下选择 MLSM_1。

在 Diagnostics 表中，可以看见拟合得很好。R-square 值为 1，已经是能得到的最好值。如果将 Order 改为 2，并单击 Build，质量没有改变什么，一阶拟合对于此函数已经很好了。

（10）在 Approximations 树中的 Response_3 下选择 MLSM_1。

在 Diagnostics 表中，可以看见拟合可以接受。R-square 值为 0.991，接近于 1.0。

在 Residuals 选择中也允许检查拟合的精度，可以采用表、点线图和柱状图。

（11）改 Order 为 2。

（12）单击 Build。

在 Diagnostics 中，R-square 为 0.998 非常接近 1.0，拟合得很好，也可以通过 Residuals 检查改进的效果。

STEP 06 运行优化

（1）在导航树中单击 Create optimization study 的空白框。
（2）单击 Add Optimization。
（3）在窗口右上侧，选择 Optimization Engine: (ARSM)-Adaptive Response Surface Method。
（4）单击 Next 按钮进入 Define design variables 对话框。
（5）分别设置变量 DesignVariable_1、DesignVariable_2 的初值 Initial values 和下限 Lower bounds 以及上限 Upper bounds 为 2.0、0.2 和 5.0。
（6）单击 Next 按钮进入 Constraints 对话框。
（7）单击 Add constraint。
（8）单击 OK 按钮。
（9）为 Apply Constraint On 从下拉表选择 Response_3。
（10）通过 Bound Type <=（小于或等于）设置上限为 0。
（11）从 Evaluate From 下拉域中选择拟合 MLSM_1。
（12）单击 Next 按钮进入 Objectives 对话框。
（13）单击 Add objective。
（14）单击 OK 按钮。
（15）从 Apply On 下拉域中选择 Response_2。
（16）从 Evaluate From 下拉域中选择拟合 MLSM_1。
（17）从 Objective 下拉域中选择 Minimize。所有优化参数不需要改变。
（18）单击 Launch Optimization。
（19）优化计算结束后，查看优化结果。

本实例所用表格 study.xls 同教程 HS-0010（本书 12.1 节的实例）所用的函数。优化结果不同是因为模型是基于 DOE 结果进行拟合得到的代理模型。

14.2 实例：关联 Excel 表格数据进行优化设计

本实例将演示如何关联 Excel 中的数据建立设计变量和设计响应，并进行优化。将目录<install_directory>/tutorials/hst/Excel/中的 Excel 文件 hst_tut_1070_spreadsheet.xls 复制到工作目录。这里所用的 Excel 的表格包含两个有初始值的设计变量，并计算梁末端的变形与体积。

STEP 01 创建 HyperStudy 的执行输入

（1）打开 Excel 表。
（2）检查表中的设计变量和设计响应。
（3）确认 Tools Macros，and Security 下的 Trusted publishers 被选中。

（4）从 Tools 下拉列表中选择 Add-Ins，确保 hw_hst_genpdd.xla 加入并激活。

如果没有此文件，则选择文件%ALTAIR_HOME%\templates\hst\hw_hst_genpdd.xla 并激活。

STEP 02 创建设计变量

（1）打开 HyperStudy。
（2）单击 Add Study。
（3）选择 New。
（4）单击 OK 按钮。
（5）通过窗口右上角的文件浏览按钮选择工作目录作为 Study directory。
（6）单击 Next 按钮进入 Create models 窗口。
（7）单击 Add model。
（8）从下拉列表中选择 Model type: Spreadsheet。
（9）单击 OK 按钮，Model_1 加入了列表。
（10）在窗口右上角通过文件浏览器选择 hst_tut_1070_spreadsheet.xls。
此步将打开表格 hst_tut_1070_spreadsheet.xls。
（11）单击 Next 按钮进入 Create design variables 窗口。
（12）单击 Add Model Parameter。
（13）选择包含设计变量名称与值的单元格，如图 14-1 所示。

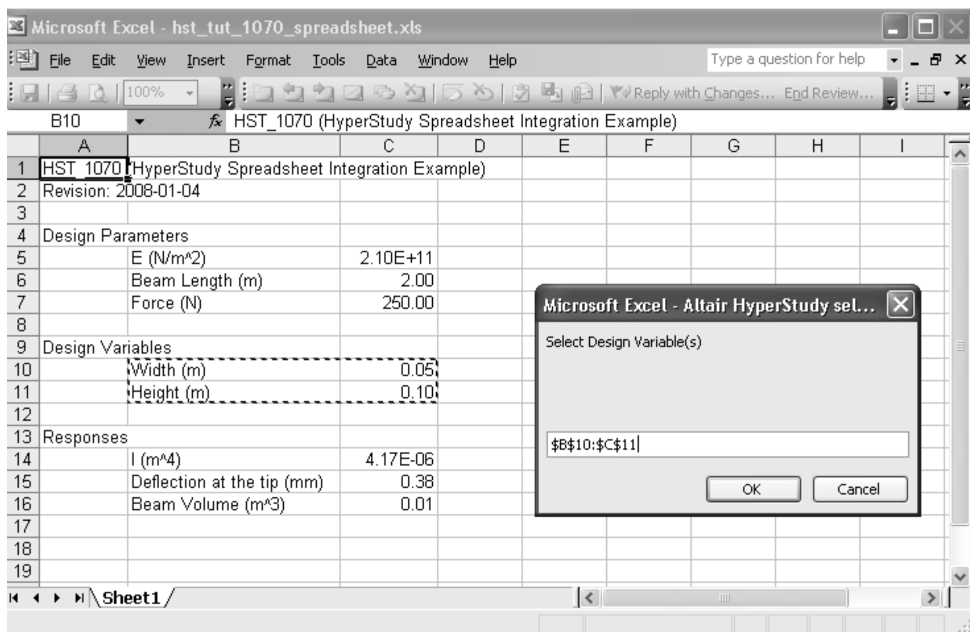


图 14-1 选择单元格

（14）单击 OK 按钮，选择包含设计响应名称与值的单元格，如图 14-2 所示。

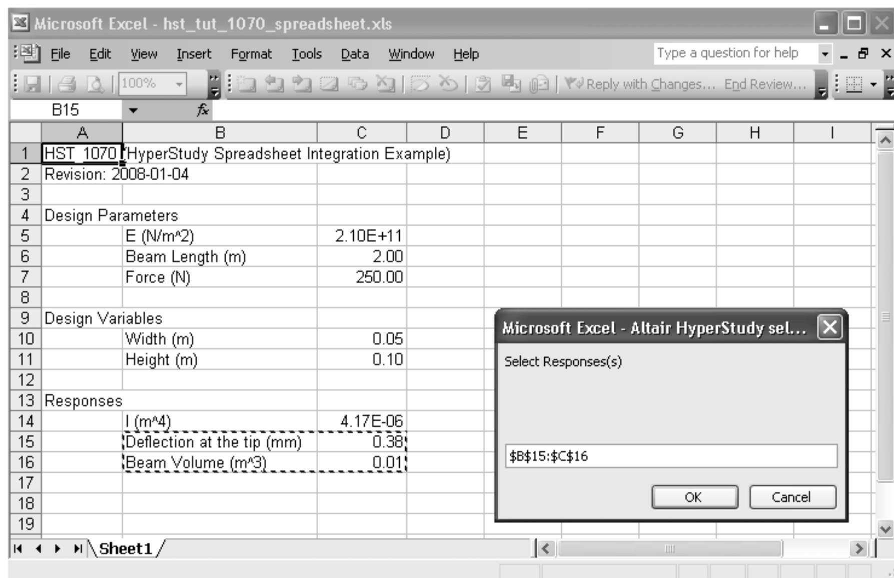


图 14-2 确认设置

（15）单击 OK 按钮两次。

现在已经为研究添加了设计变量与设计响应。

（16）单击 Next 按钮进入 Do nominal run 窗口。

STEP 03 执行 nominal 运算

（1）在 Solver input Files 区域，将会看见 hst_tut_1070_spreadsheet_input.csv。这是 HyperStudy 为求解器创建的输入文件的名字。同时将看到 SpreadSheet_HS 在 Solver execution script 的下拉列表里。不需要编辑 Solver input arguments 区域。

（2）单击 Write 按钮，之后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮。

（3）单击 Next 按钮，显示 Create responses 面板。

STEP 04 创建响应

（1）单击 Add Response。

（2）单击 Apply 按钮两次创建两个响应。

（3）单击选中 Response_1 后，单击鼠标右键。

（4）将其改名为 Tip Deflection。此响应将作为目标函数。

（5）按 Enter 键。

（6）单击 Expr. Builder，将弹出 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口。

（7）在 Vectors 面板中单击 Add 按钮，加入 vector 1。

（8）选择包含结果因子的 Vector resource file sse_output.csv file under ~/nom_run/m_1。

（9）根据下列选项定义表格中 15 行 C 列的值，作为 Vector 1。

Type：Unknown

Request：Block 1

Component：Deflection at the tip (mm)

（10）单击 Apply 按钮在表达式区域确认此向量。

（11）编辑 Response expression 并输入 v_1[0]。

（12）单击 Evaluate expression，表达式 v_1[0] 变为 0.380952。

（13）单击 OK 按钮。

（14）左击后再右击 Response_2。

（15）将其改名为 Tip Deflection。此响应将作为设计约束。

（16）单击 Enter。

（17）单击 Expr. Builder。

（18）在 Vectors 面板中单击 Add 按钮，加入向量 Vector 2。

（19）选择包含结果因子的 Vector resource file sse_output.csv file under ~/nom_run/m_1.

（20）根据下列选项定义表格中 16 行 C 列的值，作为 Vector 2。

Type：Unknown

Request：Block 1

Component：Beam Volume(m^3)

（21）单击 Apply 按钮，在表达式区域确认此向量。

（22）编辑 Response expression 并输入 v_2[0]。

（23）单击 Evaluate expression，表达式 v_1[0] 变为 0.01。

（24）单击 OK 按钮。

STEP 05 运行优化

（1）在导航树中选中 Create optimization study。

（2）单击 Add Optimization。

（3）在窗口右上角选择 Optimization Engine:（ARSM）-Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮进入 Define design variables 对话框。

（5）分别改 Initialvalues, Lower bounds, and Upper bounds for Width and Height 为 0.05, 0.04, 0.06, and 0.1, 0.09, 0.11。

（6）单击 Next 按钮进入 Constraints 对话框。

（7）单击 Add constraint。

（8）单击 OK 按钮。

（9）在 Apply Constraint On 下拉列表中选择 Tip Deflection。

（10）通过 Bound Type <=（小于等于）定义上限为 0.35。

（11）单击 Next 按钮进入 Objectives 对话框。

（12）单击 Add objective。

（13）单击 OK 按钮。

（14）从 Apply On 下拉列表中选择 Volume。

（15）从 Objective：下拉列表中选择 Minimize。任何优化参数不需要改变。

（16）单击 Launch optimization 启动优化。

可以以界面形式或者后台模式运行优化。在 Tools 下拉菜单中选择 Job Management 改变运行模式，之后单击 Job Management。

STEP 06 查看优化迭代历程

（1）HyperStudy 自动进入后处理窗口。文件 opt_1.hgres 被导入研究目录作为 Optimization results plot file。

在 Optimization Iteration History Plot and Optimization Iteration History Table 中显示不同的函数。

（2）单击显示优化迭代历程，如图 14-3 和图 14-4 所示。

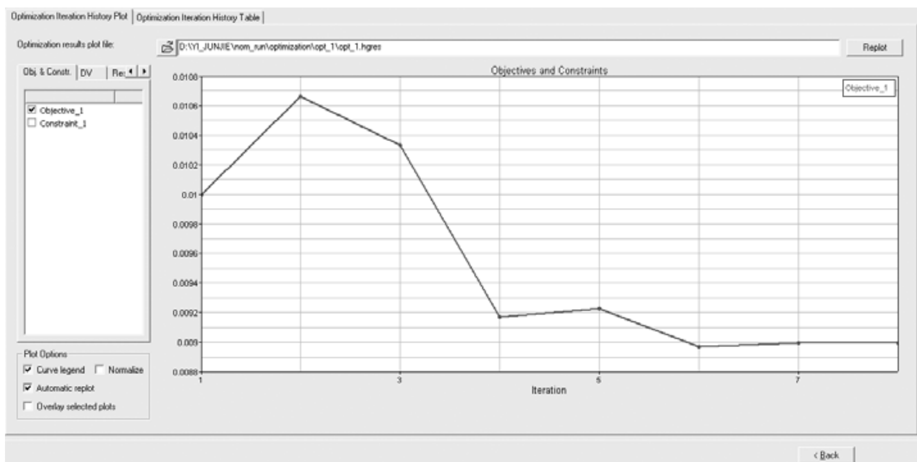


图 14-3　目标函数迭代历程

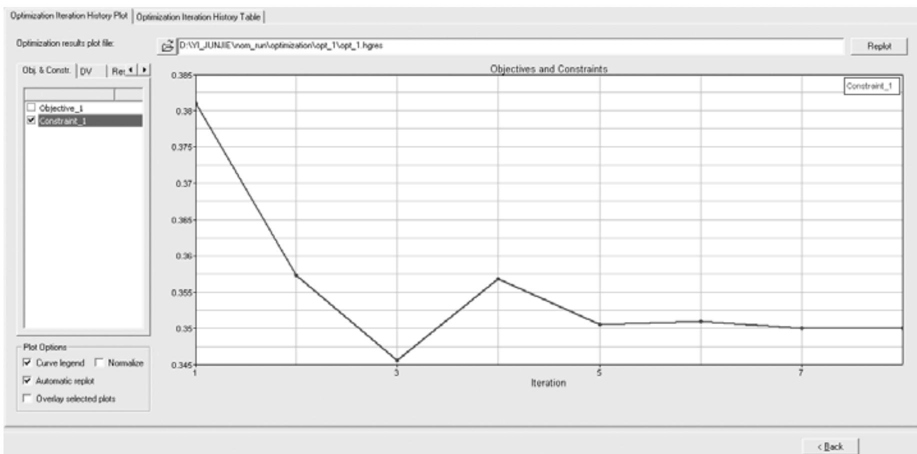


图 14-4　约束函数迭代历程

14.3　实例：基于 Excel 表格进行多目标优化

本实例将演示如何用 HyperStudy 进行多目标优化。

14.2 节实例的优化问题是：找出梁的截面尺寸，使梁在末端变形小于 0.35mm 时的体积最小。本实例接着 14.2 节的实例开始，优化问题是：梁的体积和末端变形都将作为目标函数最小化，利用多目标遗传算法（MOGA）找到一组解供权衡后挑选最佳设计。

STEP 01 从 14.2 实例开始

（1）启动 HyperStudy。

（2）重新执行在 14.2 节的实例中描述的所有步骤，或者打开保存的 HyperStudy 文件。

STEP 02 运行多目标优化

（1）在 HyperStudy 导航树中单击 Create optimization。

（2）单击 Add Optimization 并校对默认的名字与标示。

（3）在窗口右上部，选择 Optimization Engine: MOGA（Multi Objective Genetic Algorithm）。

（4）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框。检查宽度（在 0.045～0.055）和高度（0.09～0.11）的边界。

（5）单击 Next 按钮进入 Define constraints 对话框。

本实例没有约束，但是 MOGA 算法允许有约束的优化。

（6）单击 Next 按钮进入 Define objective 对话框。

（7）单击 Add objective。

（8）单击 OK 按钮。

（9）从 Apply On 下拉列表中选择 Deflection at the tip。

（10）从 Type 下拉列表中选择 Minimize。

（11）单击 Add objective。

（12）单击 OK 按钮。

（13）从 Apply On 下拉列表中选择 Beam Volume。

（14）从 Type 下拉列表中选择 Minimize。

（15）确认优化目标 Goal：设置为 MultiObjective（此选项适用于 MOGA 或 GMMO 算法）。

（16）在每个目标之前选中两个复选框打开 On，如图 14-5 所示。

Goal: Multi-Objective

	On	Label	Varname	Apply On	Evaluate from	Weight	Type
	☑	Objective_1	obj_1	Deflection at the tip (mm)	SOLVER		Minimize
▶	☑	Objective_2	obj_2	Beam Volume (m^3)	SOLVER		Minimize

图 14-5　定义目标函数

注意：HyperStudy 同样可以通过权重进行多目标优化。

在 Define Objective 面板选择算法(SQP, MFD, GA, ARSM)，在不同响应之间添加多目标，并设计目标 Goal 为 Weighted Sum.，再指定权重 Weight，为每个目标选择类型 Type（最小或最大），然后执行优化，如图 14-6 所示。

Goal: Weighted Sum

	On	Label	Varname	Apply On	Evaluate from	Weight	Type
	☑	Objective_1	obj_1	Deflection at the tip (mm)	SOLVER	1.000000	Minimize
▶	☑	Objective_2	obj_2	Beam Volume (m^3)	SOLVER	1.000000	Minimize

图 14-6　定义权重

（17）定义参数。

本实例采用 MOGA 算法的默认参数。

MOGA 的收敛由最小、最大迭代步数决定。这里采用其默认值 25 和 50，如图 14-7 所示。

（18）单击 Launch optimization，HyperStudy 进入后处理窗口。

Optimization option ((MOGA) - Multi-Objective Genetic Algorithm

Basic Parameters | Advanced Parameters | More Options

Parameter	Value
Maximum iterations	50
Minimum Iterations	25
ND Points	500
Constraint violation tol.	0.5%
Type	Real

图 14-7　设置优化参数

STEP 03　查看优化迭代步历史进程

（1）优化历史结果文件自动导入 Optimization results plot file。

（2）在面板 Obj& Constr, DV, 和 Responses 中各自的函数的标示被显示。

（3）当采用 MOGA 算法时，每个迭代步输出 ND 点。MOGA 算法的 ND 点的数量由基本参数 ND points 控制。

（4）进入 Optimization Iteration History 表并单击 Visualize 按钮进入 Optimization Post-Processing 模块。

（5）在 Optimization Post-Processing 模块，显示最后迭代步的 ND 点。

（6）选择 X-Axis 和 Y-Axis 代表的数据，多目标优化结果如图 14-8 所示。

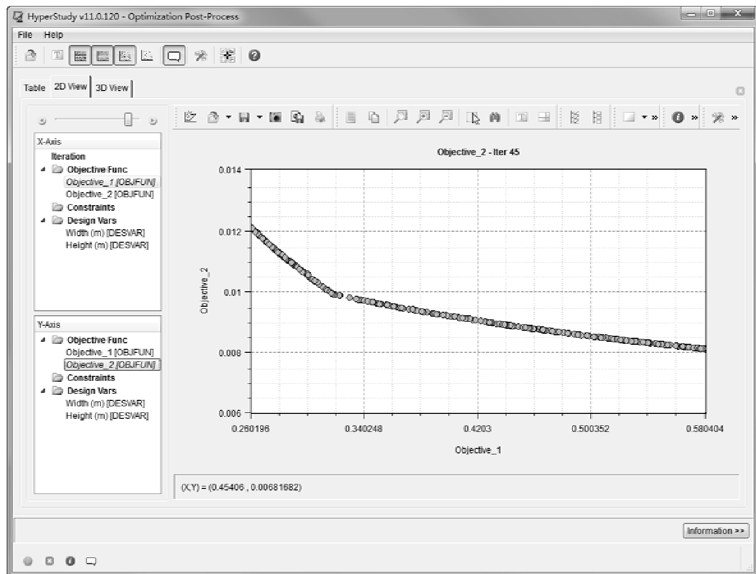


图 14-8　Optimization Post-Processing 模块

（7）可以在 ND 点之间分析权衡并选择最优解决方案，根据指定的设计要求权衡体积和末端变形。通过单击任何点可以查看相关数据。

（8）单击切换到 Post-Processing 模块进行其他结果的后处理（如数据统计或 SnakeView）。

14.4 实例：起落架支撑梁的尺寸优化

本实例通过一个具体工程实例演示 HyperStudy 同 Excel 的集成优化过程。

目标是在 10 个工况综合考虑弯曲和剪切载荷下，找出锥形 I 形梁的 3 个截面尺寸，在满足稳定安全裕度下使其总体截面面积最小。所使用的一页表格包含其初始设计值，同时有压损和稳定性的计算表格。

将目录<install_directory>/tutorials/hst/Excel/中的 Excel 文件 LandingBeamCalc_Public.xls 复制到工作目录。

STEP 01 创建 HyperStudy 执行输入

（1）打开 Excel 表格。

（2）检查设计变量与设计响应信息。

（3）更新宏安全设置。

（4）不同的 Excel 版本有其宏安全全性设置方法。

（5）Excel 2003 的宏安全全性设置方法如下。

1）在 Tools 下拉菜单中选择 Macro，再选择 Security。

2）在 Security 对话框选择 Trusted Publisher 标签。

3）激活 Trust all installed add-ins and templates。

（6）Excel 2007 的宏安全全性设置方法如下。

1）单击左上角的 office 按钮，选择“Excel 选项”。

2）单击“信任中心”，进入“信任中心设置（T）”。

3）单击“宏设置”，选中“信任对 VBA 工程对象模型的访问”。

STEP 02 创建设计变量

（1）打开 HyperStudy。

（2）单击 Add Study。

（3）选择 New。

（4）单击 OK 按钮。

（5）通过文件浏览器选择 HyperStudy 工作目录。

（6）单击 Next 按钮进入 Create models 窗口。

（7）单击 Add model。

（8）从组合框中选择 Model type: Spreadsheet。

（9）单击 OK 按钮，添加 Model_1。

（10）通过窗口右上角的文件浏览器选择 LandingBeamCalc_Public.xls.作为表格文件。

（11）打开表格 LandingBeamCalc_Public.xls。

（12）单击 Next 按钮进入 Create design variables 窗口。

（13）单击 Add Model Parameter，Excel-HyperStudy multi range selector 对话框出现在 Excel 表格之上。

（14）选择独立设计变量名与值的单元格。

1）选择第一个设计变量名与值的单元格：从表格中的 Section AA 选择 AA_W1、AA_W2 和 AA_W3。

2）单击 OK 按钮添加选择的设计变量，并为下个区域选择清空对话框。

3）继续从表格中的 Section AA 选择 AA_h1 和 AA_h2，之后单击 OK 按钮。

（15）选择下列区域，之后单击 OK 按钮继续下一个选择。

Section CC: CC_w1, CC_w2, CC_w3

Section CC: CC_h1, CC_h2

Section EE: EE_w1, EE_w2, EE_w3

Section CC: EE_h1, EE_h2

（16）单击 Cancel 按钮停止选择设计变量，进入设计响应选择。

（17）选择设计响应名与值的单元格。

（18）选择下列区域，之后单击 OK 按钮继续下一个选择。

Section AA: AA_MS_BS

Section AA: AA_MS_C

Section AA: AA_MS_B

Section CC AA_MS_BS

Section CC: AA_MS_C

Section CC: AA_MS_B

Section EE: AA_MS_BS

Section EE: AA_MS_C

Section EE: AA_MS_B

（19）Area ACE 单元格 C10 的值。

（20）单击 Cancel 按钮结束设计响应选择过程。

（21）当信息写入结束时，单击对话框中的 OK 按钮返回 HyperStudy。

（22）设计变量和设计响应已经加入到 HyperStudy。

（23）单击 Next 按钮进入 Do nominal run 窗口。

STEP 03 执行 Nominal 运算

（1）在 Solver input Files 区域将看见 Landing Beam Calc_Public.csv。这是 HyperStudy 为求解器创建的输入文件的名字。SpreadSheet_HST 出现在 Solver execution script 的下拉菜单中。不需要编辑 Solver input arguments 区域。

（2）单击 Write 按钮之后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮。

在 study 目录下创建了 nom_run/m_1 目录。在此目录，文件 sse_ouput.csv 即为 nominal 运算的结果。

（3）单击 Next 按钮。

（4）显示 Create response 面板。

STEP 04 创建设计响应

在 STEP 02 中选择的设计响应自动添加到 Response 列表中。可以通过 Response Expression Builder 查看这些响应定义。

STEP 05 运行优化

（1）在导航树中选择 Create optimization study。

（2）单击 Add Optimization。

（3）在窗口右上角选择 Optimization Engine:（SQP）-Sequential Quadratic Programming Method。

（4）单击 Next 按钮进入 Define design variables 对话框。

（5）可以核对设计变量。

（6）单击 Next 按钮进入 Constraints 对话框。

（7）单击 Add constraint。

（8）单击 OK 按钮。

（9）从 Constraint_1 下拉列表中为 Apply Constraint On 选择 AA_MS_BS。

（10）通过 Bound Type >=（大于等于）设置上限为 0.0。

（11）依据以下内容添加其他约束。

Constraint	Apply Constraint On	Bound Type >=
Constraint_2	AA_MS_C	0.2
Constraint_3	AA_MS_B	0.2
Constraint_4	CC_MS_BS	0.2
Constraint_5	CC_MS_C	0.2
Constraint_6	CC_MS_B	0.2
Constraint_7	EE_MS_BS	0.2
Constraint_8	EE_MS_C	0.2
Constraint_9	EE_MS_B	0.2

（12）单击 Next 按钮进入 Objectives 对话框。

（13）单击 Add objective。

（14）单击 OK 按钮。

（15）从 Apply On 下拉列表中选择 AreaACE。

（16）从 Objectives 下拉列表中选择 Minimize。优化参数不需要改变。

（17）单击 Launch optimization 启动优化。

（18）可以在交互模式或者后台模式运行优化。在 Tools 下拉菜单中选择 Job Management，改变运行模式，之后单击 Optimization Study。

STEP 06 查看优化迭代历史进程

（1）HyperStudy 自动进入后处理窗口。文件 opt_1.hgres 被导入研究目录作为 Optimization results plot file。

在 Optimization Iteration History Plot and Optimization Iteration History Table 中显示不同的函数。

（2）单击查看所关心的迭代历程。

14.5 小结

本章通过 4 个实例介绍了如何提取和关联 Excel 表格文件建立 HyperStudy 模型，以及在此基础上如何构建拟合模型和设置优化问题。借助 HyperStudy 与 Excel 便捷的数据接口，读者能更有效地重用储存在 Excel 表格中的数据，为分析和优化服务。

由于 Excel 表格被广泛应用于各个行业的计算中，从广义的角度讲，Excel 表格集成使得 HyperStudy 可以进行各个行业，甚至商业等领域的优化研究。

第 15 章



RADIOSS 集成优化技术实例

RADIOSS 是著名的通用数值分析软件包，具有强大的结构线性和显式、隐式非线性求解能力，拥有拉格朗日、欧拉、ALE、SPH 等算法，以及有限元、有限体积、边界元等数值处理技术；可用于解决各种结构线性静力学和动力学问题，以及结构的几何非线性（大位移、大转动和大应变）、材料非线性和接触非线性等非线性问题；也可以用于计算动载荷、静载荷下的固体结构、流体、流固耦合等问题。它特别适合于求解结构刚度/强度、NVH、碰撞/鸟撞、被动安全/结构适撞性、爆炸/冲击、跌落、陆地/水上迫降、高频振动、超高速碰撞等问题，提供无与伦比的先进技术以帮助用户提高产品性能。

本章将为读者介绍和演示 3 个基于 RADIOSS 仿真能力的优化分析案例：

- 基于撞击试验的尺寸优化。
- 基于给定材料模型的参数标定。
- 多目标形状优化。

本章重点知识

15.1 实例：撞击分析的优化设计
15.2 实例：材料模型参数标定
15.3 实例：多目标形状优化
15.4 小结

15.1 实例：撞击分析的优化设计

本实例基于采用 RADIOSS Block 数据格式的撞击分析有限元模型。读者可以在路径 <install_directory>/tutorials/hst/radioss/impactor 下找到相关文件。复制 impactor.hm, impactor_0000.rad 和 impactor_0001.rad 文件至工作文件夹中。该模型描述了一个球形冲击体按一定的初速度跌落到盒子上的过程。模型包括 8 个设计变量：4 个尺寸变量（见图 15-1），用于描述模型各个薄壁结构的厚度；4 个形状变量（见图 15-2），用于描述模型长、宽、高的特征。

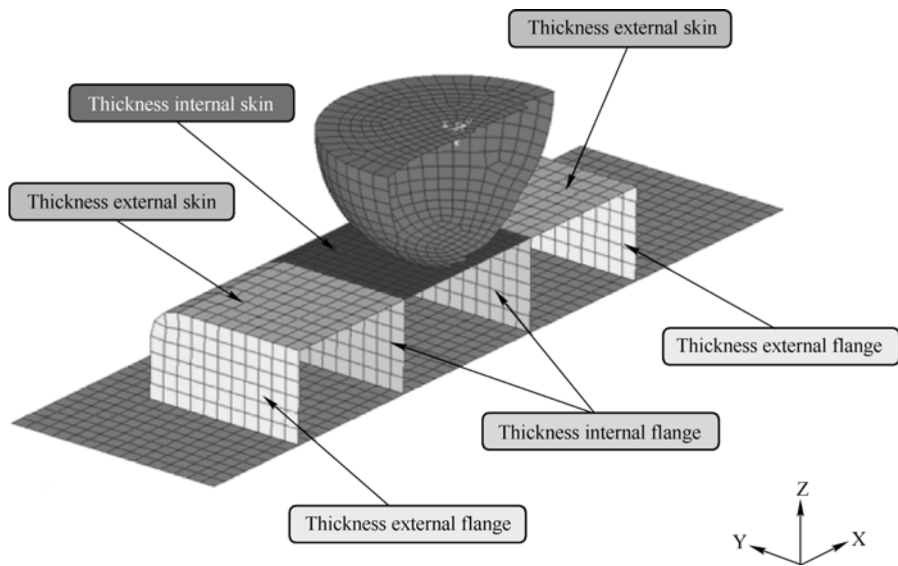


图 15-1 尺寸设计变量

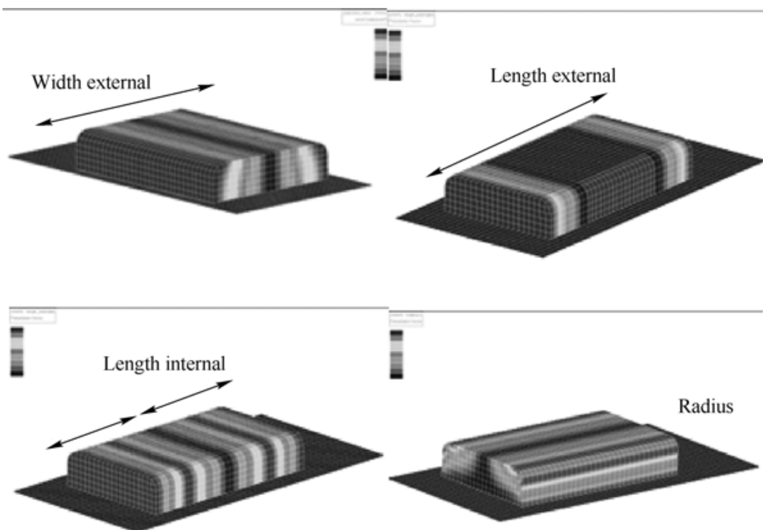


图 15-2 形状设计变量

本实例将演示如何同时进行尺寸优化和形状优化。优化问题是在撞击后最大位移不超过

16mm 的前提下，最小化撞击体（球体）在冲击过程中的峰值加速度。

本实例的内容包括以下几个方面：

- 使用 HyperStudy Editor 创建基于 RADIOSS Block Format 格式的基本输入模板。
- 建立分析模型。
- 进行筛选实验分析。
- 对实验分析结果进行后处理，分析每个设计变量的重要程度，削减设计变量的总量。
- 创建新的试验分析以用于模型近似。
- 模型近似。
- 基于近似模型进行优化研究。

STEP 01 从 HyperMesh 中输出形状变量

（1）启动 HyperMesh。

（2）在 User Profile 中，选择 RADIOSS (Bulk Data)模板。

（3）单击 File→Open，选择 impactor.hm 文件。可以看到，在 impactor.hm 数据文件中已经包含了网格、材料、单元类型、载荷、边界条件以及形状变量的信息。

（4）在 Tool 页面中单击 shape 按钮。

（5）激活 desvar，并确认当前控制参数选择为 multiple desvars。

（6）定义形状变量下限（lower bound）为-1，上限（upperbound）为 1，并设置初值（initial value）为 0（所有形状变量具有相同的上下限）。

（7）单击 shapes。

（8）选择 all shapes。

（9）单击 Select 按钮。

（10）单击 return 按钮。

（11）单击 create 按钮。

以上步骤对每个选择的形状都创建了一个形状变量。如果用户希望动态查看该形状变量的变形方式，可以单击 animate 按钮，则进入 deformed 面板。在该面板中单击 modal 或 linear 按钮就可以看到形状变量变化的动画。

（12）单击 return 按钮。

（13）返回到 shape 面板。

（14）单击 export 按钮。

（15）选择 analysis code: HyperStudy, sub-code: RADIOSS51。

（16）确认文件名为 impactorDV.shp。

（17）单击 export as。

（18）单击 Save 按钮。

（19）单击 return 按钮两次。

以上步骤创建了两个文件：

impactorDV.radioss51.node.tpl 节点坐标模板文件。

impactorDV.shp 节点扰动向量文件，由节点模板文件 impactorDV.radioss51.node.tpl 进行

读取。

STEP 02 在 HyperStudy 中创建基本的输入模板

（1）启动 HyperStudy。HyperStudy 可以在 HyperMesh 中通过 Applications 下拉菜单中的 Applications 启动，或通过独立模式启动。

（2）在 HyperStudy 菜单中，选择 Utilities→Editor。

（3）打开文件 impactor_0000.rad。

（4）在文本文件中找到/NODE 关键字。

（5）单击高亮/NODE 卡片。

（6）单击鼠标右键，并选择 Shape Template。

（7）打开文件 impactordv.radioss51.node.tpl。

（8）当 Design Variable Properties 窗口弹出时，单击 OK 按钮。

（9）形状变量创建完毕。原有 0000.rad 文件中的节点被形状参数所取代。

（10）按照表 15-1 的内容定义尺寸变量。

表 15-1　设计变量表

属性名称	变量名称	初　值	下限值	上限值
prop_external_skin	th_external_skin	1.0	1.0	2.0
prop_internal_skin	th_internal_skin	1.0	1.0	2.0
prop_external_flange	th_external_flange	1.0	1.0	2.0
prop_internal_flange	th_internal_flange	1.0	1.0	2.0

RADIOSS Block format 使用固定的 20 个字符宽度的栏宽用于存储相关参数。为了更容易地选取该区域，需要首先要求 HyperStudy 的预设栏宽为 20 个字符。

（11）在下拉菜单中，选择 Design→Format→Fixed。

（12）在同一下拉菜单下，单击 Design Variables Selection Properties，然后设置 Selector 为 20，如图 15-3 所示。

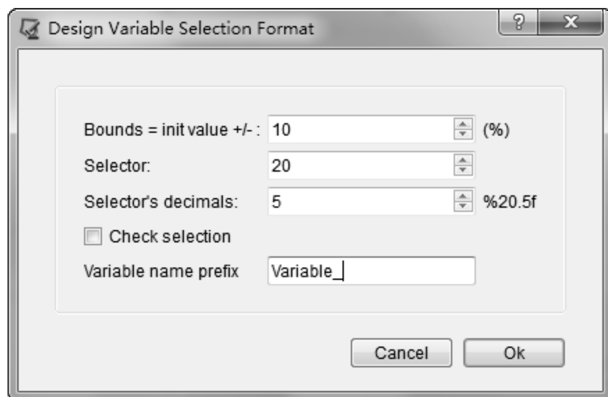


图 15-3　设置 Selector 格式

（13）为了选择 Thickness 一栏，按住〈Ctrl〉键单击，如图 15-4 所示。

```
/PROP/SHELL/1
prop_impactor
#   Ishell    Ismstr     Ish3n
        24         2         0
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#        N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
         5         0                  .5                   1                   1         1
#---1----|----2
```

图 15-4　选择 Thickness 一栏

（14）单击鼠标右键并选择 Design variable。

（15）定义设计变量，如图 15-5 所示。

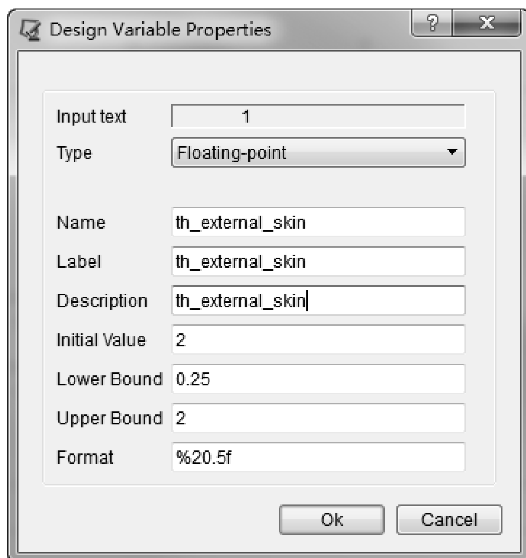


图 15-5　设计变量定义

（16）重复步骤（12）～（14）以创建每个尺寸变量。

（17）选择各个 property 名称（可使用 Edit 下拉菜单中的 Find）。

（18）单击 Show/generate Templex 按钮创建模板代码。

（19）在 File→Export as→中，将当前输入模板保存为 impactor.tpl。

（20）关闭 HyperStudy Editor。

STEP 03 进行基本设置与求解

（1）在 HyperStudy 中，单击 Add Study。

（2）选择 New。

（3）单击 OK 按钮。

（4）在 Study directory 中选择工作文件夹。

（5）单击 Next 按钮进入 Create models 窗口。

（6）单击 Add model。

（7）单击 OK 按钮，在列表中添加了一个新模型。

（8）找到右上角的 tempate file 窗口。

（9）选择上一步在工作文件夹中创建的模板 impactor.tpl。

（10）单击 Open 按钮。

（11）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框。

（12）按照表 15-2 修改设计变量的上、下限。

表 15-2　设计变量的上、下限

变量名称	初　值	下 限 值	上 限 值
th_external_skin	1.0	1.0	2.0
th_internal_skin	1.0	1.0	2.0
th_external_flange	1.0	1.0	2.0
th_internal_flange	1.0	1.0	2.0
Radius	0	-1	1
length_external	0	-1	1
width_external	0	-1	1
length_internal	0	-1	1

（13）单击 Next 按钮进入 Do nominal run 窗口。

（14）在 Solver input file 中，输入 impactor_0000.rad 和 impactor_0001.rad。

（15）这两个文件为递交 RADIOSS 求解的 Starter File 和 Engine File。

（16）在 Solver execution script 的下拉菜单中选择 RADIOSS。

（17）在 Solver input arguments 中，除了已有的$file，另加入参数–both –noh3d –nproc X。

这两个参数分别表示要求 RADIOSS Starter 和 Engine 完成碰撞分析，以及在求解结束后不生成 h3d 结果文件。X 是计算机中可支配的 CPU 个数。使用所有的 CPU 可提高计算速度。

（18）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，则在工作文件夹下会建立名为 nom_run/m_1 的目录，包含与求解结果相关的各类信息。其中，文件 impactorT01 包含时间历程信息。

（19）单击 Next 按钮。

STEP 04 建立响应

在这一练习中，需要监测跌落体的峰值加速度和被冲击体（盒子）表面的最大位移。由于这两项结果数据均与时间相关，所以需要提取这两项数据在整个求解历程中的最大值。

（1）单击 Add Response。

（2）将 label 改名为 Max_Acceleration 并单击 OK 按钮。

（3）创建第二个名为 Max_Displacement 的响应。

（4）单击 Max_Acceleration。

（5）单击 Expr Builder，弹出 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口。

（6）在 Vectors 面板中单击 Add 按钮，创建了名为 Vector 1 的结果向量。该向量的内容还需要被进一步定义。

（7）单击 Vector resource file 中的浏览按钮并选择 impactorT01 文件。

（8）在 Vectors 标签右下方的下拉菜单中，将 Vector 1 定义为时间向量，如图 15-6 所示。

（9）重复步骤（6）～（8），分别建立向量 Impactor acceleration（Z-方向）和 impactor displacement （Z-方向），如图 15-7 所示。



图 15-6　Vector1 为 time

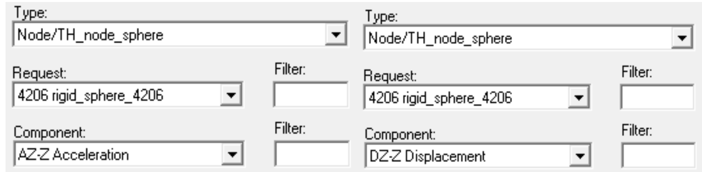


图 15-7　撞击体 Z 轴方向的加速度向量和 Z 轴方向的位移向量

首先创建 Max_Acceleration 响应，其中存在一些噪声，用滤波器去除噪声，如图 15-8 所示。

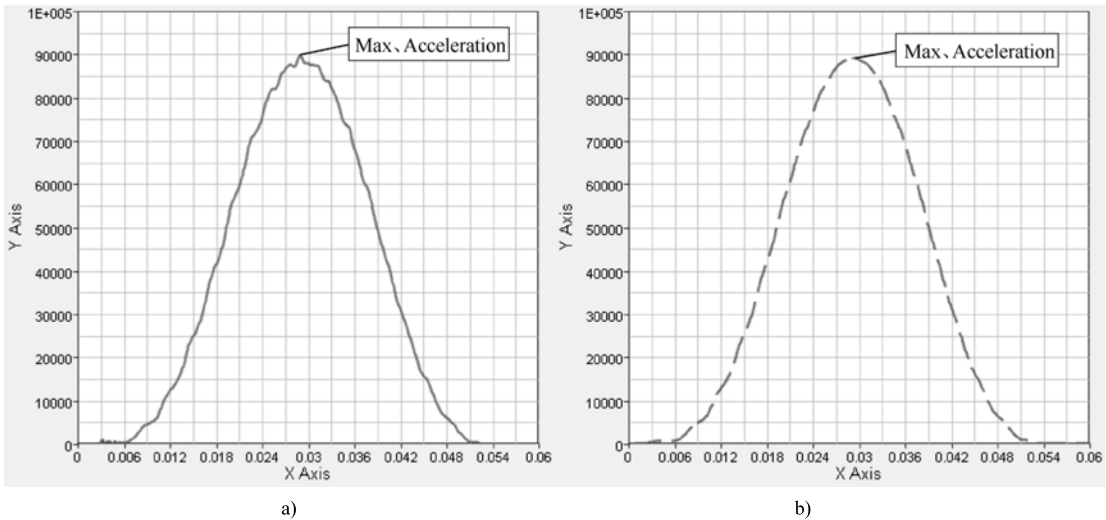


图 15-8　加速度曲线

a) 没有滤波时的加速度　b) 使用滤波器后的加速度

（10）对加速度向量进行滤波，调用函数 SAEFILTER。该函数需要时间向量和加速度向量作为输入。设置类参数为 180，最后得到表达式：saefilter(v_1,v_2,180)。

（11）从其时间-加速度曲线中提取最大值（数值被除以 9810 以转换为重力加速度单位），表达式更新为 max(saefilter(v_1,v_2,180)/9810)。

（12）复制该表达式到 Expression Field，然后选中 Evaluate response expression box。表达式 max(saefilter(v_1,v_2,180)/9810)的值应变为 9.08796。

创建名为 Max_displacement 的响应以描述最大位移。以时间为 x 轴，可以得到如图 15-9

所示的曲线。

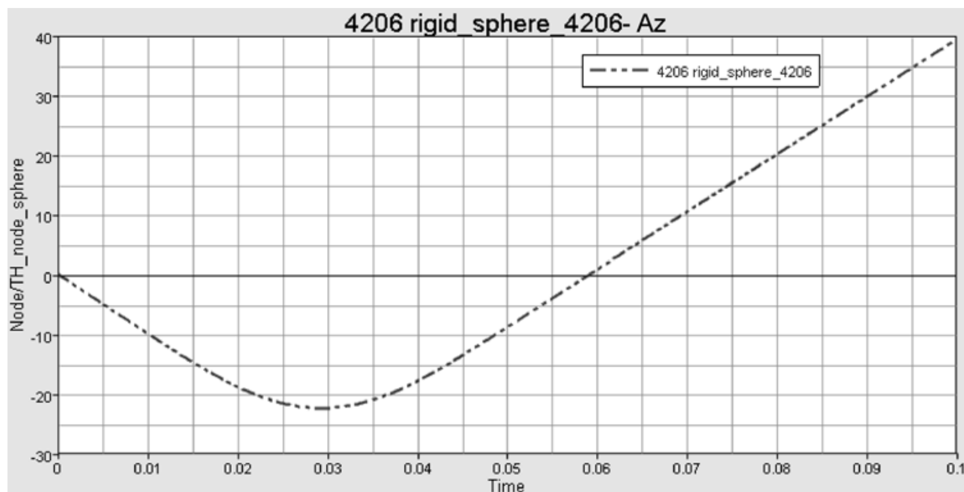


图 15-9　最大位移曲线

（13）双击向量 Max_Displacement，打开 Expression Builder。

（14）输入表达式 abs(min(v_3))。

（15）选中 Evaluate response expression，则表达式 abs(min(v_3))应被数值 22.4252 所取代。

（16）单击 OK 按钮。

基本的模型定义结束。用户可以在该模型的基础上进行试验设计，优化和随机性分析等研究。

STEP 05 进行筛选试验设计

进行筛选实验设计模型共有 8 个设计变量。直接进行优化设计或模型近似会耗费大量的计算资源。

因此，通过筛选试验设计来减少设计变量的个数。如果使用全因子方法，8 个设计变量以及每个设计变量 2 个取值水平需要运行计算次数会达到 2^8 (256) 次。如果每个设计变量 3 个取值水平，则会达到 6561 次。因此使用 Plackett-Burman 方法来进行筛选试验设计。

（1）选中 Create DOE study。

（2）单击 Add DOE Study。

（3）单击 OK 按钮。

（4）在 Controlled factors 中，设置 DOE Class 为 Plackett-Burman。

（5）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框。

（6）单击 Next 按钮进入 Interactions 对话框。参数不需要做任何修正。

（7）单击 Next 按钮，该页面显示了自动选取的 12 个设计变量的组合或设计点。

（8）单击 Next 按钮。

（9）在 DOE Response 面板中查看所有的响应。

（10）单击 Next 按钮。

（11）单击 Write/Execute 按钮。

（12）在弹出的对话框中选择 Yes 按钮。

（13）单击 Next 按钮，进入 Extract responses 页面。

（14）单击>> Extract >>，则 HyperStudy 会在 12 次运行的结果中提取相应的信息。

（15）所有结果提取完毕后，单击 Next 按钮进入 Post-processing 窗口。

STEP 06 筛选试验设计后处理

从 Plackett Burman 试验设计中得到的最大加速度和最大位移的主效应图如图 15-10 和图 15-11 所示。

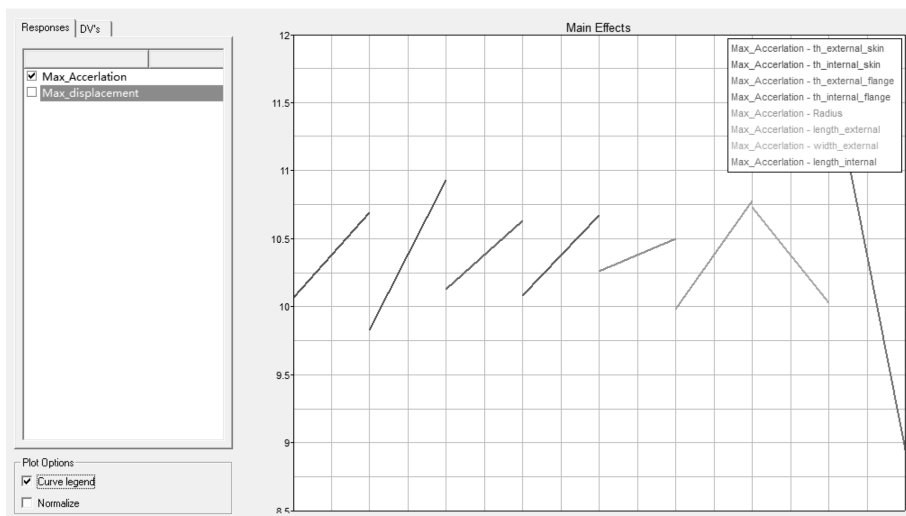


图 15-10 最大加速度的主效应图

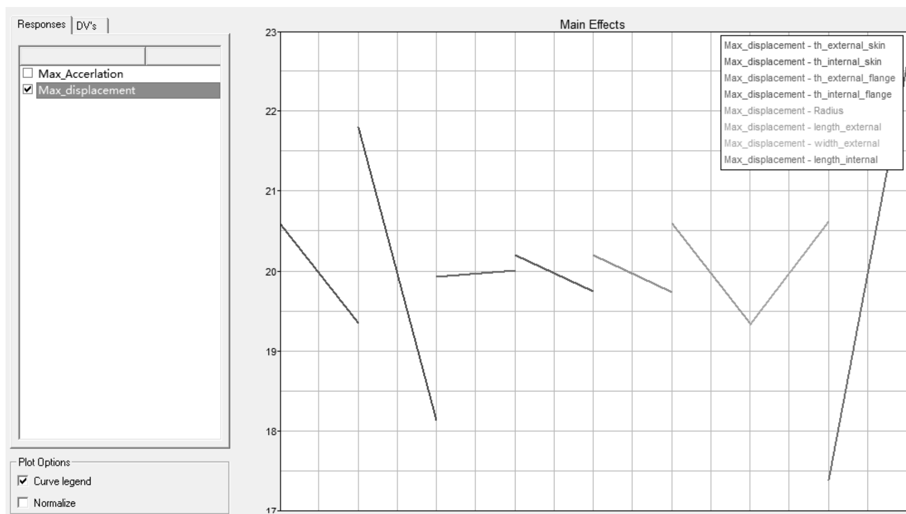


图 15-11 最大位移的主效应图

通过上面两个图，可以看到：

✓ 4 处厚度尺寸变量增加，峰值加速度增加。

✓ 4 处厚度尺寸变量增加，最大位移减小。

✓ 可以去掉半径变量，因为其对最终的输出基本没有影响。

为了进一步削减设计变量的个数，去掉 3 个对输出影响较小的设计变量。

✓ th_external Flange

✓ th_internal Flange

✓ Radius

（1）在 post-processing 面板下，单击 Visualize 按钮，将打开 DOE 后处理模块，并打开相应的结果文件（扩展名.data）。

（2）打开数据挖掘模块 Data Mining，进行 PCA 数据分析。完成分析后，单击 Display regressions button 按钮。HyperStudy 将以直方图的形式给出各个设计变量的回归系数。该数值越高，表示该设计变量对最终的输出影响越大，如图 15-12 所示。

通过该直方图可以看到，设计变量 thickness external flange、Radius、length external 以及 width external 的影响较小。这和前面分析的结果一致。

在经典的试验设计分析中，研究各个设计变量的主效应，并研究其之间的作用关系。在该示例中进行的筛选试验设计不能考查各个设计变量间的交互作用。

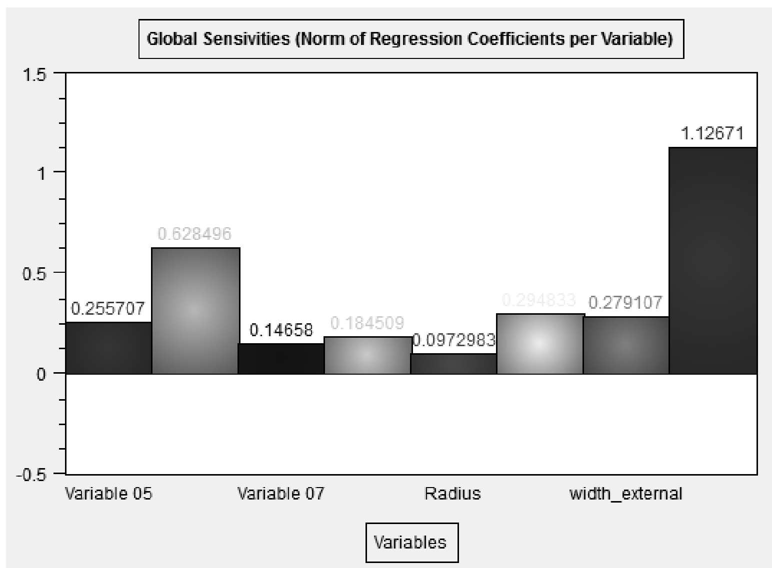


图 15-12　每个设计变量的回归系数

在余下的章节中，只考虑以下设计变量：

✓ th_external_skin

✓ th_internal_skin

✓ length_external

✓ width_external

✓ length_internal

其他被筛选掉的设计变量保持其初始设计值不变。

STEP 07 进行试验设计以建立近似模型

由于优化研究是基于响应面方法的，因此使用中央复合设计方法。该方法适合创建二阶响应面。

（1）单击 Create DOE study。

（2）单击 Add DOE Study。

（3）单击 OK 按钮。

（4）在 Controlled factors 设置 DOE Class 为 Central Composite。

（5）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框。

（6）去掉以下 3 个设计变量：th_external_flange、th_internal_flange 和 Radius，如图 15-13 所示。

Design variables

	On	Label	Variable Name	Model Parameter
▶	☑	th_external_skin	m_1_th_external_skin	m_1.th_external_skin
	☑	th_internal_skin	m_1_th_internal_skin	m_1.th_internal_skin
	☐	th_external_flange	m_1_th_external_flang	m_1.th_external_flang
	☐	th_internal_flange	m_1_th_internal_flang	m_1.th_internal_flange
	☐	Radius	m_1_Radius	m_1.Radius
	☑	length_external	m_1_length_external	m_1.length_external
	☑	width_external	m_1_width_external	m_1.width_external
	☑	length_internal	m_1_length_internal	m_1.length_internal

图 15-13　去除 3 个设计变量

（7）单击 Next 按钮进入 Interactions 对话框。此处不需要做任何修改。

（8）单击 Next 按钮，该页面显示了设计矩阵的详细信息。设计矩阵包含了 43 个设计变量的组合或设计。

（9）单击 Next 按钮，进入 DOE responses 对话框。

（10）查看所有的响应。

（11）单击 Next 按钮，进入递交求解页面。

（12）单击 Write/Execute 按钮。

（13）在弹出的页面中选择 Yes 按钮，HyperStudy 将驱动 RADIOSS 进行 43 次运算。

（14）单击 Next 按钮进入 Extract responses 页面。

（15）单击 >> Extract >>。

HyperStudy 将从所有递交求解的结果中提取响应值。

（16）当所有的结果提取完毕后，单击 Next 按钮进入 Post-processing 窗口。

STEP 08 进行试验设计为模型近似提供检验矩阵（validation matrix）

这里将使用另外的设计点来检验近似模型的质量，采用 10 个样本点的拉丁超立方。

（1）单击 Create DOE study 。
（2）单击 Add DOE Study。
（3）单击 OK 按钮。
（4）在 Controlled factors 设置 DOE Class 为 Latin HyperCube
（5）设置 number of runs 为 10。
（6）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框。
（7）去掉以下 3 个设计变量：th_external_flange、th_internal_flange 和 Radius，如图 15-13 所示。
（8）单击 Next 按钮进入 Interactions 对话框。此处不需要做任何修改。
（9）单击 Next 按钮，该页面显示了设计矩阵的详细信息。
（10）单击 Next 按钮，将进入 DOE responses 对话框。
（11）查看所有的响应。
（12）单击 Next 按钮，进入递交求解页面。
（13）单击 Write/Execute 按钮。
（14）在弹出的页面中，选择 Yes，HyperStudy 将驱动 RADIOSS 进行 10 次运算。
（15）单击 Next 按钮进入 Extract responses 页面。
（16）单击 >> Extract >>。
HyperStudy 将从 10 次运行结果中提取响应值。

STEP 09 建立近似模型

（1）选中 Create approximation。
（2）单击 Add 按钮。
（3）选择 Approximation Type: MLSM。
（4）请确认选中了 Add to all。
（5）单击 OK 按钮。
（6）单击 Next 按钮。
（7）单击 Import Matrix 并选择 doe_2。
（8）单击 OK 按钮，接下来将为 Validation Matrix 添加另一个试验设计。
（9）单击 Import Matrix 并选择 doe_3。
（10）单击 OK 按钮。
（11）进入 Build Approximation 面板。
（12）在 Basic parameters 面板中为两个响应均选择 2nd order。
（13）为两个响应均设置 the closeness of fit 为 Automatic。
（14）为两个响应均设置 **fitting quality criterione** 为 **Max. abs error**。

在 Diagnostics 表中可以看到，模型近似的质量是非常高的。对响应 max_acceleration 和 max_displacement R-square value 达到了 0.99。使用二阶近似模型针对此类响应是非常合适的。也可通过 Residuals 面板来检验模型近似的精度，可以使用残差表、分布图或直方图。

STEP 10 优化设计

（1）选中 Create optimization。

（2）单击 Add optimization，然后单击 OK 按钮，接受默认设置。

（3）在用户界面的右上角，选择优化引擎为 Optimization Engine:（GA）- Genetic Algorithm。

（4）单击 Next 按钮进入 Design variables 对话框，该对话框可以帮助用户查看所有的设计变量。

（5）单击 Next 按钮进入 Define constraints 对话框。

（6）单击 Add constraint。

（7）单击 OK 按钮。

（8）在 Apply Constraint On 下拉菜单中选择 max_displacement。

（9）设置 Bound Type <=上限为 16.0。

（10）切换 evaluate 的参数，由 Solver 切换至 MSLM_1。

（11）单击 Next 按钮进入 Define objective 对话框。

（12）单击 Add Objective。

（13）单击 OK 按钮。

（14）在 Apply on 下拉菜单中，选择 max_acceleration。

（15）将 evaluate 从 Solver 切换到 MSLM_1。

（16）在 Objective 下拉菜单中，选择 Minimize。

（17）将基本参数 Type 设置为 Real，然后设置 Constraint violation tolerance 为 0.0。

（18）单击 Launch Optimization，在优化迭代启动以后，HyperStudy 会自动切换到后处理页面，并显示迭代历程。

优化迭代历程可以显示目标函数、设计变量和响应的变化情况。图 15-14 显示了目标函数和约束函数的优化历程。当优化收敛时，约束值得以满足。

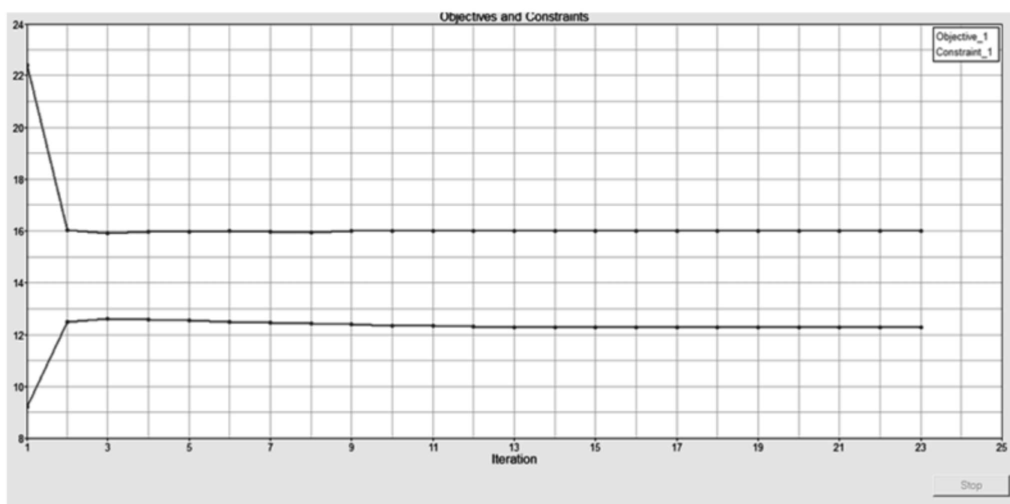


图 15-14　优化迭代历史

（19）单击优化迭代历程表可以查看每一迭代步的数据，如图 15-15 所示。

（20）从图 15-15 所示的迭代历程表中可以看到，迭代步 1 和迭代步 2 不满足约束。

Iteration	Objective_1	Constraint_1	th_external…	th_internal…	length_ext…	width_exte…	length_inte…	Max_Accer…	Max_displ…
1	9.8703316	21.727243	1.0000000	1.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	9.8703316	21.727243
2	13.017706	15.942581	1.1461010	1.9840467	-0.4858041	-0.9172216	-0.9988249	13.017706	15.942581
3	12.931847	15.973263	1.1117083	1.9877203	-0.6598647	-0.9489232	-0.9995270	12.931847	15.973263
4	12.931847	15.973263	1.1117083	1.9877203	-0.6598647	-0.9489232	-0.9995270	12.931847	15.973263
5	12.931847	15.973263	1.1117083	1.9877203	-0.6598647	-0.9489232	-0.9995270	12.931847	15.973263
6	12.877363	15.994927	1.0297652	1.9998759	-0.3801689	-0.9582619	-0.9999739	12.877363	15.994927
7	12.846424	15.990998	1.0994610	1.9997051	-0.9451048	-0.9581426	-0.9997729	12.846424	15.990998
8	12.846424	15.990998	1.0994610	1.9997051	-0.9451048	-0.9581426	-0.9997729	12.846424	15.990998
9	12.846424	15.990998	1.0994610	1.9997051	-0.9451048	-0.9581426	-0.9997729	12.846424	15.990998
10	12.827120	15.999663	1.0974692	1.9995255	-1.0000000	-0.9590850	-0.9997121	12.827120	15.999663
11	12.827120	15.999663	1.0974692	1.9995255	-1.0000000	-0.9590850	-0.9997121	12.827120	15.999663
12	12.827120	15.999663	1.0974692	1.9995255	-1.0000000	-0.9590850	-0.9997121	12.827120	15.999663
13	12.827120	15.999663	1.0974692	1.9995255	-1.0000000	-0.9590850	-0.9997121	12.827120	15.999663
14	12.827120	15.999663	1.0974692	1.9995255	-1.0000000	-0.9590850	-0.9997121	12.827120	15.999663
15	12.825733	15.992202	1.0924261	1.9996668	-0.9828795	-0.9881186	-0.9993929	12.825733	15.992202
16	12.817366	15.999940	1.0898956	1.9994816	-0.9995222	-0.9765674	-0.9997429	12.817366	15.999940
17	12.817366	15.999940	1.0898956	1.9994816	-0.9995222	-0.9765674	-0.9997429	12.817366	15.999940
18	12.817366	15.999940	1.0898956	1.9994816	-0.9995222	-0.9765674	-0.9997429	12.817366	15.999940
19	12.817366	15.999940	1.0898956	1.9994816	-0.9995222	-0.9765674	-0.9997429	12.817366	15.999940
20	12.817226	15.999998	1.0898956	1.9994816	-1.0000000	-0.9765674	-0.9997429	12.817226	15.999998
21	12.817226	15.999998	1.0898956	1.9994816	-1.0000000	-0.9765674	-0.9997429	12.817226	15.999998
22	12.816967	15.999996	1.0894009	1.9995839	-0.9989713	-0.9766323	-0.9997909	12.816967	15.999996
23	12.816967	15.999996	1.0894009	1.9995839	-0.9989713	-0.9766323	-0.9997909	12.816967	15.999996
24	12.816944	15.999452	1.0892788	1.9996347	-0.9995818	-0.9777351	-0.9999047	12.816944	15.999452
25	12.816255	15.999177	1.0887694	1.9997862	-0.9999098	-0.9791127	-0.9999094	12.816255	15.999177

图 15-15　优化迭代历程表

STEP 11 求解基于近似模型得到的优化结果

优化后的设计变量值如表 15-3 所示。对该最优解在有限元模型中进行求解以检验所得到的结果是否与真实模型接近。

表 15-3　优化的设计变量表

变 量 名 称	优　化　值
th_external_skin	1.99866
th_internal_skin	1.99998
th_external_flange	1.0
th_internal_flange	1.0
Radius	0
length_external	0.94312
width_external	0.05656
length_internal	−0.99998

（1）在 Study setup 中单击 Create design variables。

（2）将模型中各个设计变量的初值替换为优化后的结果。

（3）单击 Next 按钮。

（4）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮。

（5）通过检查 Evaluate Expressions 计算响应。

（6）表 15-4 给出了基于近似模型的求解结果，以及将优化结果代入原模型后进行求解得到的结果。

表 15-4 近似模型的偏差

响应值	近似模型	有限元求解
Max_Acceleration	12.291	12.372 （0.66% error）
Max_Displacement	15.999	15.924 （0.47% error）

15.2 实例：材料模型参数标定

本节将介绍一个对 RADIOSS Block Format 格式的弹塑性材料模型的参数进行标定的方法。通过对铝板进行拉伸试验数值模拟，并通过与物理实验结果对标的方式，确定材料模型中的各个参数的取值。该方法也称为材料参数反演。

考虑到该模型的对称特点，仅选择了该铝板的 1/4（见图 15-16）建立有限元模型（见图 15-17），并在相关位置施加了对称边界条件。在铝板的左端施加了速度以模拟拉伸试验。

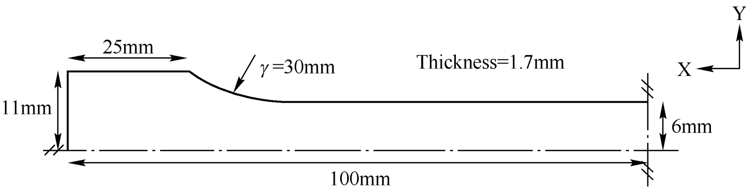


图 15-16 铝板 1/4 几何模型

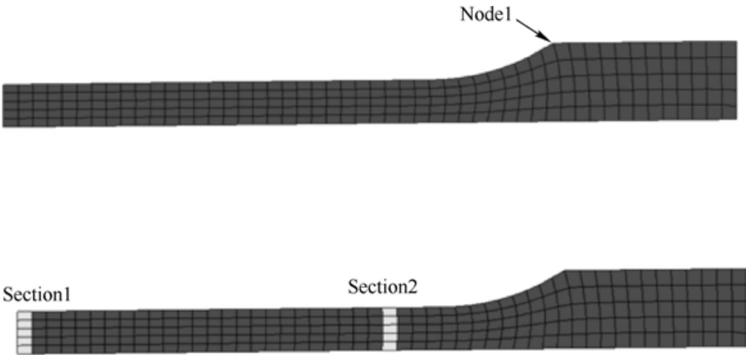


图 15-17 剖分完毕的铝板有限元模型

材料 6063 T7 铝在 RADIOSS 中可以被看做不带损伤参数的各向同性弹塑性材料，并使用 Johnson-cook 本构方程进行描述，即 RADIOSS Block Law2，如图 15-18 所示。

$$\sigma = (a+b\varepsilon_p^n)(1+c\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1-T^{*m})$$

塑性应变影响项；应变率影响项；温度变化影响项

σ = Stress level

ε_p = Plastic strain

a = Yield stress

b = Hardening modulus

n = Hardening Exponent

c = Strain rate coefficient

$\dot{\varepsilon}$ = Strain rate

$\dot{\varepsilon}_0$ = Reference strain rate

图 15-18　Johnson-cook 材料本构

在参数化模型中，参数 a、b、n、σ_{max}（maximum stress）以及杨氏模量 Young modulus 均被定义为设计变量。图 15-19 给出了实际的拉伸试验所获得的该 6063 T7 铝板所获得的铝材质应力-应变曲线。

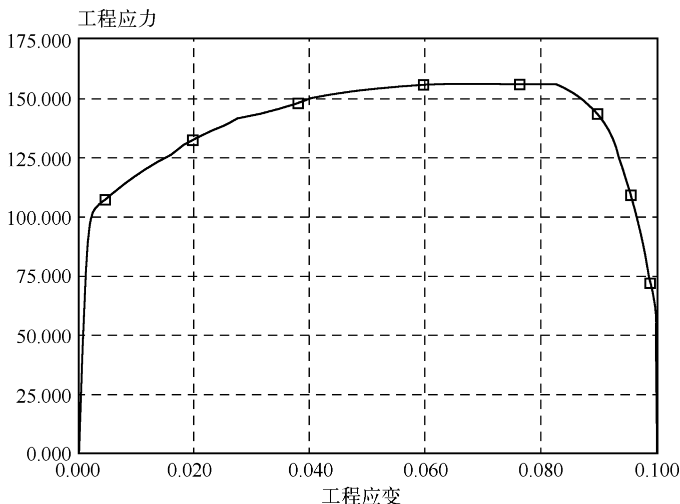


图 15-19　由实验获得的铝材质应力-应变曲线

对模拟结果，应变的计算方法为节点 1（node1）的位移与其参考长度（75mm）之比。应力的计算方法为截面 1（section 1，见图 15-17）的力除以其初始截面积（12.012mm^2）。

在本节的练习中将学习以下内容：

- 使用 HyperStudy 的 Template Editor 创建并输出 RADIOSS Block Data 文件。
- 建立优化模型。
- 系统辨识优化。

可以在目录<install_directory>/tutorials/hst/radioss/law_fitting 下找到分析所需要的基本文件。将文件 TENSILE_TEST_0000.rad 与 TENSILE_TEST_0001.rad 复制到工作文件夹下。由数值模拟获得的应力-应变曲线，如图 15-20 所示。

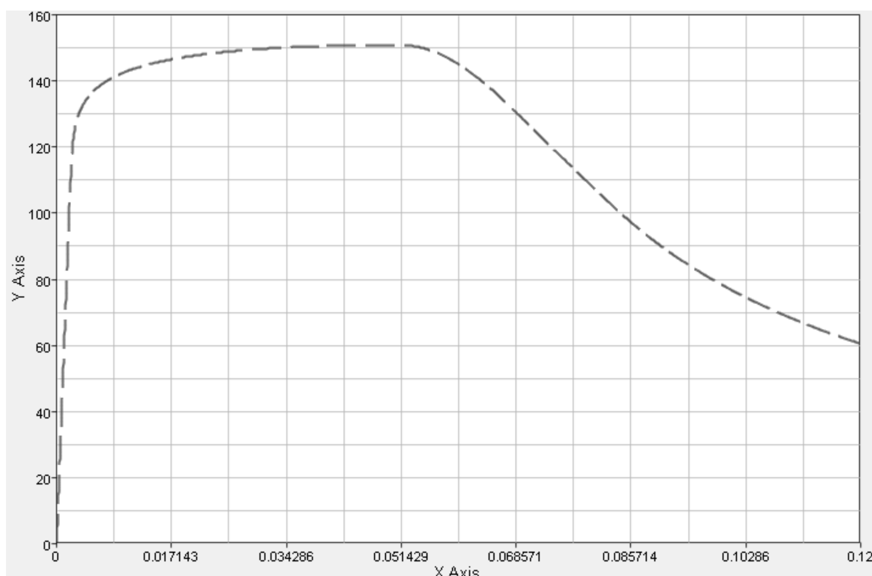


图 15-20　由数值模拟获得的应力-应变曲线

STEP 01 在 HyperStudy 中建立基本的输入模板

（1）启动 HyperStudy。HyperStudy 可以由独立模式启动，也可以在 HyperMesh 中通过 Applications 下拉菜单启动。

（2）在 Utilities 下拉菜单中，选择 Editor。在打开的窗口中，通过 File 选择已经复制至工作文件夹下的 TENSILE_TEST_0000.rad 文件。在 RADIOSS 11.0 中，使用 20 个字符长度的固定栏宽输入参数。所以，首先需要设定每一栏的字符数，以帮助 HyperStudy 正确地找到每一个参数。

（3）在 Design→Format 中，选择 Fixed。

（4）从相同的菜单中单击 Design Variables Selection Properties 并将 Selector Value 设置为 20，如图 15-21 所示。

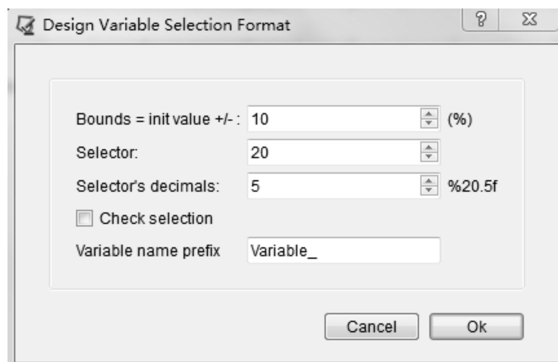


图 15-21　设置 Radioss 字段长度

（5）在 TENSILE_TEST_0000.rad 文件中，搜索关键字/MAT/PLAS_JOHNS/1，按住〈Ctrl〉键单击选择代表杨氏模量的一栏，如图 15-22 所示。

```
/MAT/PLAS_JOHNS/1
Law_2
#         Init. dens.          Ref. dens.
               .0027               .0027
#                  E                  Nu
               60400                 .33
#                  a                   b                   n             Eps_max              sigmax
             95.0000              180.00                  .2                   0                 270
#                  c                EPS0      Icc    Fsmooth               F_CUT
                   0                   0        0          0                   0
#                  m              T_melt               rhoCp                 T_i
                   0                   0                   0                   0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
#-  3. NODES:
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 15-22　杨氏模量的选择

（6）在选中的一栏上单击鼠标右键，并选择 Design variable。

（7）按图 15-23 所示分别填入设计变量名称、上下限取值及其初始取值。

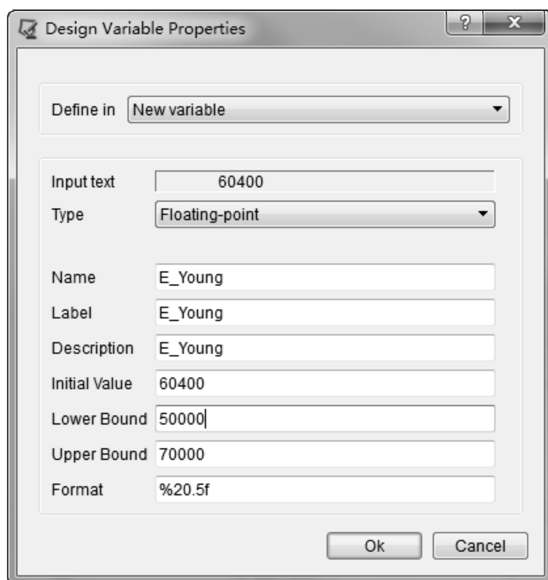


图 15-23　变量 E 的参数化

（8）重复以上步骤，按照表 15-5 的响应内容定义另外 4 个设计变量。

表 15-5　材料参数变量

参数名称	变量名称	初始取值	取值下限	取值上限
Young modulus (E)	E_Young	60400	50000	70000
Yield Stress (a)	a_PlasticityYieldStress	110	90	120
Hardening modulus (b)	b_HardeningCoeff	120	100	160
Hardening exponent (n)	n_HardeningExpo	0.15	0.1	0.3
Sigma Max (σ)	Sigma_Max	280	250	290

（9）单击 Show/Generate Templex ，生成模板文件。

（10）在 File 中选择 Export as，输出文件名为 TENSILE_TEST_0000.tpl 的模板文件。

（11）关闭 HyperStudy Editor 窗口。

（12）单击 Add Study。

（13）选择 New，Add Study 的对话框将显示在用户界面中。

（14）单击 OK 按钮。

（15）选择工作文件夹为 Study directory。

（16）单击 Next 按钮，进入 Create models 窗口。

（17）单击 Add Model。

（18）单击 OK 按钮，列表中添加了一个新模型。

（19）在右上角，单击 Template file。

（20）选择已经创建的 TENSILE_TEST_0000.tpl 模板文件。

（21）单击 Open 按钮。

（22）单击 Next 按钮，继续进入 Design Variables 对话框。

（23）检查设计变量的上、下限取值情况。

（24）单击 Next 按钮，进入 Do nominal run 窗口。

（25）在 Solver input file 一栏，填入 TENSILE_TEST_0000.rad ; TENSILE_TEST_0001.rad，即 RADIOSS Block 的 Starter File 和 Engine File。

（26）在 Solver execution script 下拉菜单中选择 RADIOSS。

（27）在 Solver input arguments 中，除了已有的$file，另填入-both -noh3d –nproc X。

其中，参数-both 表示使用 Engine File 驱动 Starter File 进行计算。参数-noh3d 表示在求解结束后不生成 h3d 文件。X 应为用户所指定的 CPU 的数量。

（28）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，则在工作文件夹下会自动创建名为 nom_run/m_1/ 的文件夹，并包括求解所生成的各类结果文件。其中文件 TENSILE_TESTT01 包括时间历程结果。

（29）单击 Next 按钮。

STEP 02 建立响应

为了将 RADIOSS 的应力/应变曲线与实验数据相拟合，要找到比较这两条曲线的方法。由于未考虑材料的损伤，这里不会比较在缩颈现象出现之后两条曲线所发生的差异。

在本实例中，只关注曲线上的 3 个特征点，如图 15-24 所示。

- 点 1：应变为 0.02 时，实验结果与 RADIOSS 之间的应力结果的差异。
- 点 2：在缩颈现象出现时，实验结果与 RADIOSS 在应力结果上的差异。
- 点 3：在缩颈现象出现时，实验结果与 RADIOSS 在应变结果上的差异。

（1）单击 Next 按钮进入 Create responses 窗口。

（2）单击 Add Response。

（3）单击 Apply 按钮 3 次，以创建 3 个响应。

（4）单击 Cancel 按钮。



图 15-24　用于比较的 3 个特征点

（5）用鼠标右键单击 Response_1。
（6）将其名称改为 Radioss_Strain_0_2。
（7）用鼠标右键单击 Response_2。
（8）将其名称改为 Radioss_Stress_Necking。
（9）用鼠标右键单击 Response_3。
（10）将其名称改为 Radioss_Strain_Necking。
（11）双击 Radioss_Strain_0_2。
在下面的步骤中将建立指向节点位移值的响应向量。
（12）在 Vectors 面板下，单击 Add 按钮。
（13）选择向量源文件为 TENSILE_TESTT01。
（14）定义 Vector 1 为 Displacement，其名称为 Disp_sim，其设置如图 15-25 所示。
下面将定义响应向量 vector 2，指向 Radioss Force。
（15）在 Vectors 面板下，单击 Add 按钮。
（16）选择向量源文件 TENSILE_TESTT01。
（17）定义 Vector 2 为 force 向量，名称为 Force_sim，其设置如图 15-26 所示。

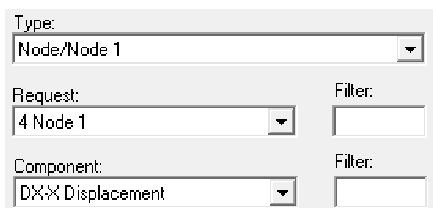


图 15-25　向量 1 定义

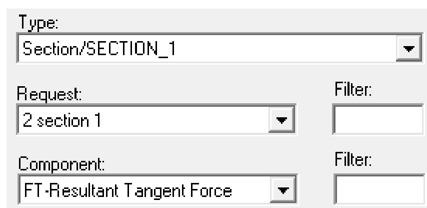


图 15-26　向量 2 定义

（18）响应 Radioss_Strain_0_2 按以下表达式进行计算。

lininterp(v_1/75,v_2/12.012,0.02)

该表达式计算了当应变为 0.02 时的应力结果。

选中 Evaluate response expression 该表达式的取值将变为 147.148。

（19）响应 Radioss_Stress_Necking 按以下表达式计算。

max(v_2[subrange(v_1,min(v_1),v_1[indexofmax(v_2)])])/12.012

这是力(v_2)在最小应变和最大力值处应变之间的最大值，并除以 12.012（截面积）。

选中 Evaluate response expression 该表达式的取值将变为 150.531。

（20）响应 Radioss_Strain_Necking 按以下表达式计算。

v_1[maxindex(subrange(v_1,min(v_1),v_1[indexofmax(v_2)]))]/75

该式计算了最大集中力处的节点相对位移（v_1），并除以参考长度 75mm 以得到工程应变。

选中 Evaluate response expression 表达式的取值应为 0.0484。

STEP 03 优化设计

（1）选中 Create optimization study。

（2）单击 Add optimization，然后单击 OK 按钮。

（3）在用户界面右上角，选择优化引擎 Optimization Engine: (ARSM) – Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮，进入 Design variables 对话框，该对话框允许用户查看此前定义完成的设计变量。

（5）单击 Next 按钮，进入 Define constraints 对话框。该优化问题没有设计约束。

（6）单击 Next 按钮，继续进行 Define objective 的设置。

（7）选择 System Identification 为 Goal。

（8）单击 Add Objective。

（9）单击 Apply 按钮两次。

（10）单击 OK 按钮。

在本练习中，需要在 3 个特征点处进行系统辨识以比较两条曲线的差异。

（11）在第一个响应处，在下拉菜单 Apply On 中选择 Radioss_Strain_0_2，并设置目标值 Target value 为 141。

（12）在第二个响应处，选择 Radioss_Stress_Necking，并设置其目标值 Target value 为 148。

（13）在第三个响应处，选择 Radioss_Strain_Necking，并设置其目标值 Target value 为 0.08。

（14）单击 Launch Optimization.。

HyperStudy 将自动切换到后处理页面并显示迭代历程。优化历程可以显示目标函数，设计变量以及响应的变化曲线。图 15-27 显示了目标函数的历程，目标函数已成功地收敛到指定值。

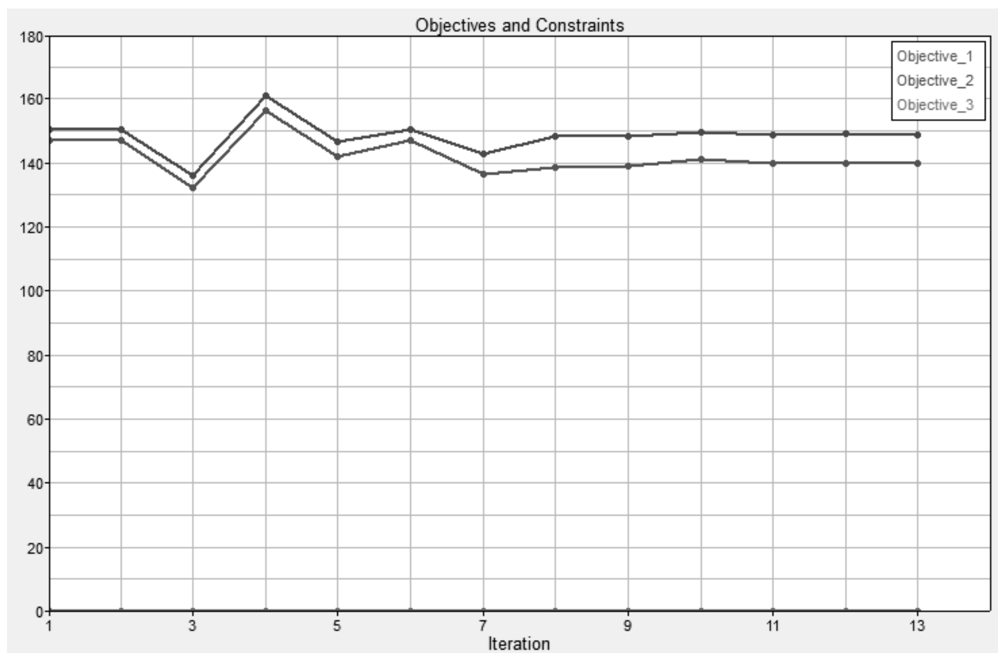


图 15-27　目标函数历程

（15）单击优化历程表可以查看每一迭代步的数据。

由图 15-28 可以看到，目标函数收敛于 149.1、0.0794、140.05，而设定的目标值为 148、0.08、141。

Iteration	Objective_1	Objective_2	Objective_3	Young's M...	Plasticity Yi...	Hardening...	Hardenin...	Max Stress	Stress @ S...	S
1	147.14768	150.53141	0.0484000	60400.000	110.00000	120.00000	0.1500000	280.00000	147.14768	
2	146.91161	150.47707	0.0498667	50434.000	110.00000	120.00000	0.1500000	280.00000	146.91161	
3	132.17615	136.17500	0.0555360	60400.000	91.850000	120.00000	0.1500000	280.00000	132.17615	
4	156.25315	160.95656	0.0546010	60400.000	110.00000	139.80000	0.1500000	280.00000	156.25315	
5	142.09073	146.44479	0.0556688	60400.000	110.00000	120.00000	0.1747500	280.00000	142.09073	
6	147.14768	150.53141	0.0484000	60400.000	110.00000	120.00000	0.1500000	250.00000	147.14768	
7	136.59997	143.02639	0.0674017	60399.993	93.609356	138.00000	0.1725000	280.00000	136.59997	
8	138.55895	148.47111	0.0822026	60399.988	93.182180	158.70000	0.1983750	280.04120	138.55895	
9	138.91699	148.10977	0.0801339	60399.990	100.01194	150.72632	0.2086940	280.16840	138.91699	
10	140.92582	149.42693	0.0788004	60400.014	112.56334	141.27704	0.2341922	290.00000	140.92582	
11	139.71808	148.89114	0.0801359	60399.990	100.80111	151.02142	0.2084687	280.21811	139.71808	
12	139.92902	149.07904	0.0793355	60399.991	100.91841	151.08846	0.2080491	280.23983	139.92902	
13	139.71808	148.89114	0.0801359	60399.990	100.80111	151.02142	0.2084687	280.21811	139.71808	

图 15-28　优化历程表

15.3　实例：多目标形状优化

本实例将演示一个典型的机械结构多目标形状优化问题。拉杆模型如图 15-29 所示。该拉杆一端固定，另一端承受轴向载荷。

在使用 HyperStudy 进行多目标形状优化之前，该模型已在 HyperMesh 中完成了基本的几何清理和网格剖分工作（见图 15-30），并设置了载荷和边界条件。使用 HyperWorks 中的有限元求解器 RADIOSS 进行线性静力求解。

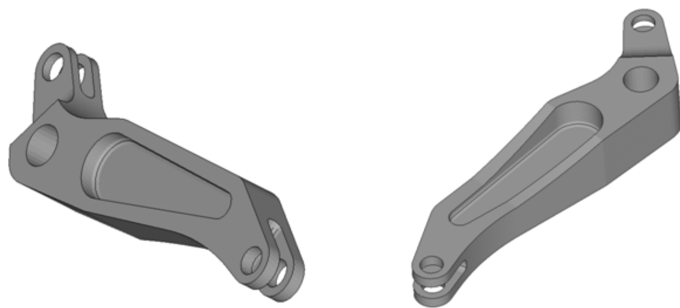


图 15-29　拉杆模型



图 15-30　载荷及边界条件

优化问题是在集中力加载点的位移小于某一额定值的前提下，最小化重量和应力水平。

原始设计方案中，拉杆的体积为 1.7667mm^3，集中力加载点的位移为 1.41mm，模型中最大应力为 195.29MPa。

该模型的形状优化设计变量包括拉杆长度和高度方向上的 6 个形状变量，以及 3 处开孔处的孔径，如图 15-31 所示。

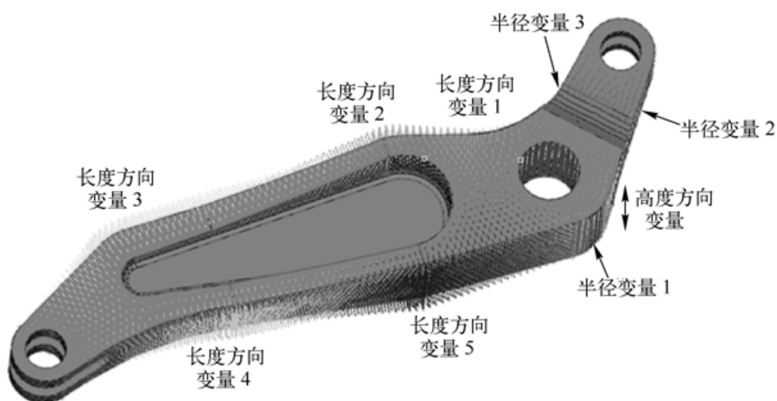


图 15-31　形状优化设计变量

用户可以在路径<install_directory>/tutorials/hst/radioss/crank 下找到文件 crank_morph.hm 并将其复制至工作文件夹下。

STEP 01 从 HyperMesh 输出形状优化变量

（1）启动 HyperMesh。

（2）在 User Profile 中，选择 RADIOSS（Bulk Data）模板。

（3）单击 File→Open，选择 crank_morph.hm 文件。

可以注意到，在文件 crank_morph.hm 中已经包含了网格、材料、单元类型、载荷及边界条件，以及形状变量的信息。

（4）在 HyperMesh 主菜单中，切换到 Analysis 页面下。

（5）单击 Optimization 按钮。

（6）单击 Shape 按钮。

（7）激活 desvar，并确认当前控制参数选择为 multiple desvars。

（8）定义形状变量下限为-1，上限为 1，并设置初值 initial value 为 0（所有形状变量的取值范围均为-1～1）。

（9）单击 shapes。

（10）选择 all shapes。

（11）单击 Select 按钮。

（12）单击 return 按钮。

（13）单击 create 按钮。

以上步骤完成了形状优化设计变量的定义。

（14）如果用户希望动态查看该形状变量的变化方式，则可以单击 animate 按钮。

（15）选中 export。

（16）选择 analysis code: HyperStudy, sub-code: Optistruct。

（17）确认输入文件名为 crankDV.shp。

（18）单击 export as。

（19）单击 Save 按钮。

（20）单击 return 按钮两次。

以上步骤创建了两个文件：

crankDV.optistruct.node.tpl 节点坐标模板文件。

crankDV.shp 节点扰动向量文件，由节点模板文件 crankDV.optistruct.node.tpl 进行读取。

STEP 02 在 HyperStudy 中创建基本的输入模板

（1）启动 HyperStudy。HyperStudy 可以以独立的模式，或者在 HyperMesh Applications 下拉菜单中直接启动。

（2）在 Utilities 菜单中，选择 Editor。

（3）在编辑器窗口中，选择 File，选择查看对象为.fem 文件，并选择 crank_model.fem 文件。

（4）找到第一个 GRID 卡片。

（5）高亮显示整个 GRID 卡片部分。

（6）单击鼠标右键，选择 Shape Template 打开文件浏览器。

（7）选择文件 crankDV.optistruct.node.tpl。

（8）单击 Open 按钮。

（9）当 Design Variable Properties 窗口出现时，单击 OK 按钮。

（10）单击 Show/Generate Templex 按钮以产生模板代码。

（11）在 File 中，选择 Save as，并命名为 crank.tpl 文件。

（12）关闭 HyperStudy 编辑器。

STEP 03 进行基本设置与求解

（1）在 HyperStudy 主窗口中，选择 Add Study。

（2）选择 New。

（3）此时，HyperStudy 用户界面中将弹出 Add Study 窗口。

（4）单击 OK 按钮。

（5）在工作界面右上角的 Study Directory 中，选择此前指定的工作文件夹。

（6）单击 Next 按钮，进入 Creat models 窗口。

（7）单击 Add model。

（8）单击 OK 按钮，在列表中完成了新模型的添加。

（9）在 Template File 中，选取工作文件夹下的 crank.tpl 文件。

（10）单击 Open 按钮。

（11）单击 Next 按钮，进入 Design Variables 页面。

在该页面下，可以查看和修改每一形状设计变量的下限和上限。该页面以列表的形式给出了所有的形状变量的设置情况，如表 15-6 所示。

表 15-6 形状变量

变 量 名 称	初 值	下 限 值	上 限 值
长度方向变量 1	0	−0.5	2
长度方向变量 2	0	0	2
长度方向变量 3	0	−1	1
长度方向变量 4	0	−1	1
长度方向变量 5	0	−1	1
半径变量 1	0	−2	2
半径变量 2	0	−0.5	1
半径变量 3	0	−0.5	1
高度方向变量	0	−1	1

（12）单击 Next 按钮，进入 Do nominal run 窗口。

（13）在 Solver input file 一栏中输入 crank.fem。这是由 HyperStudy 创建的求解器输入文件的名字。

（14）在 Solver input arguments 一栏中增加-core in，使求解器以最佳的内存设置运行。

（15）在 Solver execution script 一栏的下拉菜单中选择求解器 RADIOSS。

（16）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，则在工作文件夹下会自动创建新的路径 A nom_run/m_1/。其中，crank.res 文件包含了有限元分析的结果；而 crank.out 文件则包含了求解相关信息，如模型体积等方面的内容。

（17）单击 Next 按钮。

STEP 04 建立响应

这里需要为该模型的体积、集中力加载点（node 35527）的位移，以及最大应力分别建立响应。

（1）单击 Click Add Response。

（2）在 label 中，为该响应命名 Max_Stress 然后单击 OK 按钮。

（3）建立第二个名为 Disp_35527 的响应。

（4）建立第三个名为 Volume 的响应。

（5）单击 Max_Stress。

（6）单击 Expr Builder，在用户界面中会弹出 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口。

（7）输入表达式 max(resvector("m_1/crank.res",2,0,13844,0,0,0))，然后选中 Evaluate response expression。该表达式将读取结果文件，并返回最大应力值 stress = 195.294。

（8）关闭 Response Expression Builder。

（9）单击 Disp_35527。

（10）在 Vectors 面板中单击 Add 按钮，创建名为 Vector 1 的结果向量。下面还需要为该结果向量定义内容。

（11）在 Vector resource file 中，选择 crank.res。

（12）按照图 15-32 所示定义 Vector 1，以使得该向量指向节点 35527 的位移结果。选中 Evaluate response expression 表达式的值应为 1.25549。

（13）关闭 Response Expression Builder。

（14）单击 Volume。

（15）在 Vectors 面板中单击 Add 按钮，创建名为 Vector 2 的结果向量。下面还需要为该结果向量添加内容。

（16）在 Vector resource file 中，选择 crank.out 文件。

（17）按图 15-33 所示定义 Vector 2，保证其指向模型的体积信息。

（18）单击 Apply 按钮，在 Expression 中调用该向量，v_2[0]应出现在 Expression 中。

选中 Evaluate response expression，该表达式的值应变为 1.76676e+006，即拉杆的初始

体积。

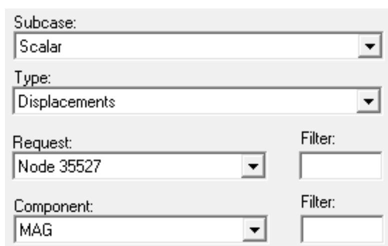


图 15-32 向量 1 定义

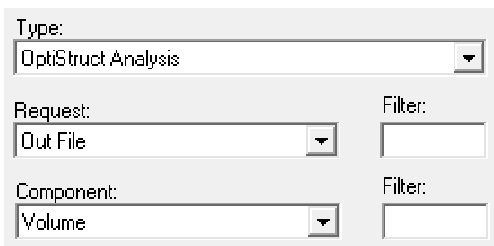


图 15-33 向量 2 定义

（19）单击 OK 按钮。

到此为止，完成了模型定义的基本工作。以此为基础，可以对该模型进行试验设计、优化和随机分析等各类研究。

STEP 05 筛选试验设计

由于该模型中包含了较多的设计变量，所以需要对设计变量进行筛选。在该实例中，使用 Plackett Burman 方法。

（1）选中 Create DOE study。

（2）单击 Add DOE Study。

（3）单击 OK 按钮。

（4）在 Controlled factors 中选择 DOE Class 为 Plackett Burman。

（5）单击 Next 按钮，进入 Design Variables 对话框。

（6）单击 Next 按钮，进入 Interactions 对话框。此处的设置不需要进行任何修改。

（7）单击 Next 按钮。这一页面给出了设计矩阵。该矩阵自动选取了 12 种设计变量组合。

（8）单击 Next 按钮，进入 DOE responses 对话框。

（9）查看所有响应。

（10）单击 Next 按钮，进入递交求解的页面。

（11）单击 Write/Execute 按钮。

（12）在弹出的对话框中单击 Yes 按钮，HyperStudy 将驱动求解器进行 12 次求解。

（13）单击 Next 按钮，进入 Extract Responses。

（14）单击 Extract，HyperStudy 将提取 12 次求解中各个响应的取值情况。

（15）完成了响应的提取后，单击 Next 按钮，进入 Post-processing 窗口。

STEP 06 对筛选试验设计进行后处理

查看体积、最大应力、最大应变的主效应图，如图 15-34～图 15-36 所示。

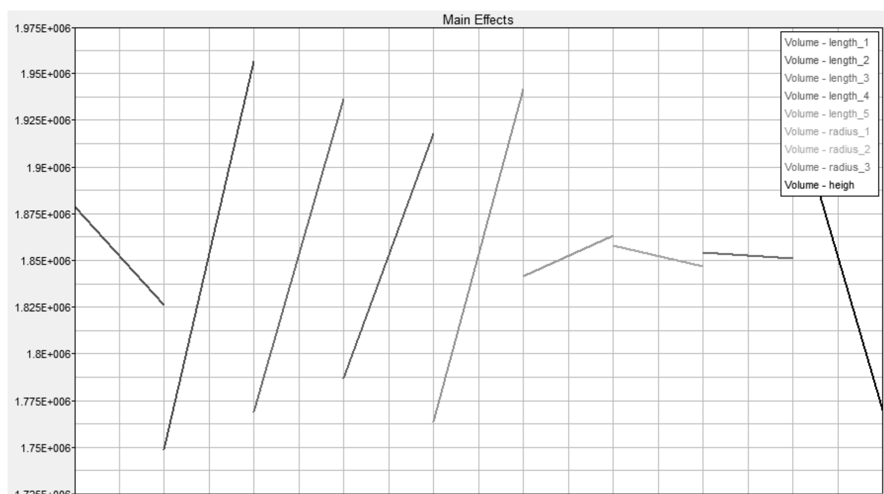


图 15-34 体积的主效应图

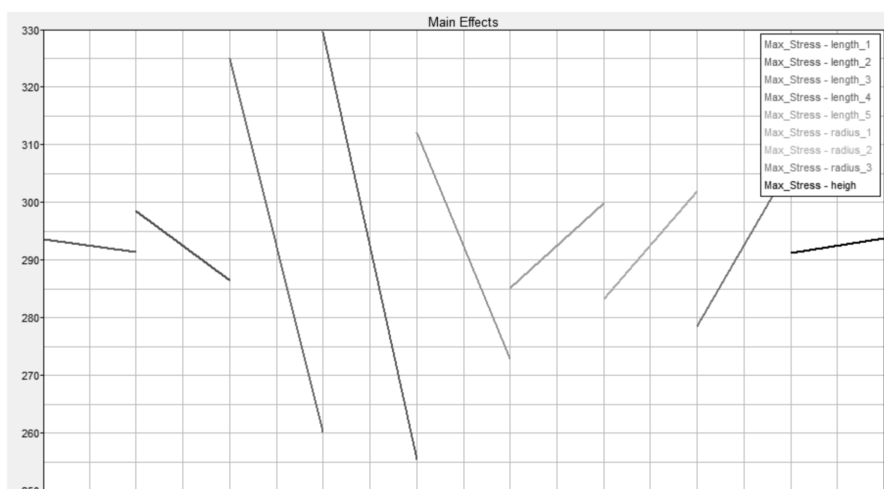


图 15-35 最大应力的主效应图

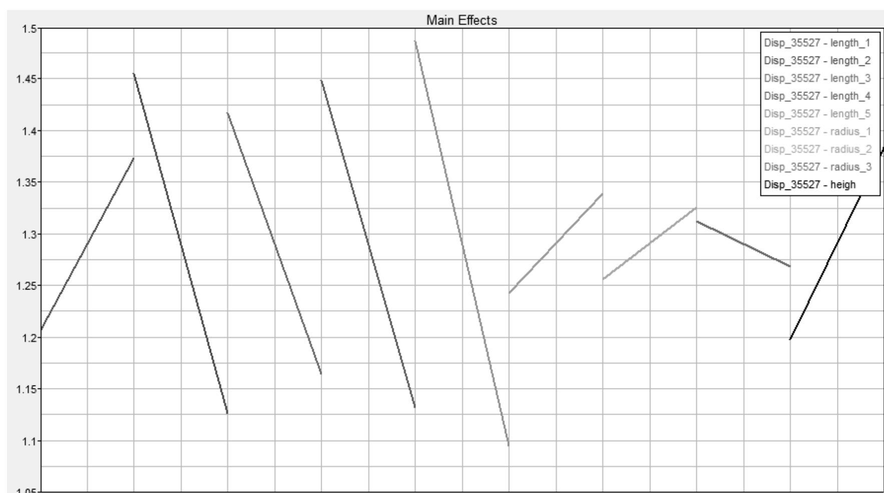


图 15-36 最大位移的主效应图

通过以上 3 个图可以看到，代表孔径信息的设计变量 radius_1、radius_2 和 radius_3 可以被筛选掉，因为其对最终目标响应的影响要弱于其他的设计变量。

本节将在此基础上，对模型进行优化研究。该模型的优化研究是基于响应面方法的。为了构建响应面，需要建立一个新的 DOE 模型。

STEP 07 进行两次试验设计以获得响应面

这两个试验设计将用来获取响应面。首先创建一个 100 次运行的哈默斯利试验设计作为 input matrix，然后再建立一个 20 次运行的拉丁超立方试验设计作为 validation matrix。

（1）选中 Create DOE study。
（2）单击 Add DOE Study。
（3）单击 OK 按钮。
（4）在 Controlled factors 设置 DOE Class 为 Hammersley。
（5）设置 number of runs 为 100。
（6）单击 Next 按钮，进入 Design Variables 对话框。
（7）屏蔽 Radius_1、Radius_2 和 Radius_3 三个设计变量。
（8）单击 Next 按钮，进入 Interactions 对话框，此处的参数不需要进行修改。
（9）单击 Next 按钮，将显示出筛选后的设计变量矩阵。
（10）单击 Next 按钮，进入 DOE responses 页面。
（11）查看所有的响应。
（12）单击 Next 按钮，将进入提交计算面板。
（13）单击 Write/Execute 按钮。
（14）在弹出的窗口中选择 Yes，将进行 100 次运行计算。
（15）单击 Next 按钮，进入 Extract responses 页面。
（16）单击 Extract，HyperStudy 将从 100 次运行计算的结果中提取响应。
（17）重复步骤（1）～（16），建立一个 20 次运行的拉丁超立方试验设计。

STEP 08 建立近似模型

（1）选中 Create approximation。
（2）单击 Add。
（3）选择 Approximation Type: Moving Least Squares Regression。
（4）确认已经选中了 Add to all。
（5）单击 OK 按钮。
（6）单击 Next 按钮。
（7）单击 Import Matrix，然后选择 doe_1。
（8）单击 OK 按钮。
（9）单击 Validation Matrix，然后选择 doe_2。

（10）单击 Next 按钮。
（11）针对每个响应进行以下操作：
1）设置 Order response 为 2。
2）将参数 Closeness of fit 切换为 Automatic。
3）设置 fitting quality criterion 为 Max Abs error。
（12）单击 Next 按钮进入 Residuals 页面，查看近似模型的精度。

STEP 09 进行优化设计

（1）选中 Create optimization。
（2）单击 Add optimization。
（3）在用户界面的右上角，选择优化算法为 Optimization Engine：MOGA-Multiple Objective Genetic Algorithm。
（4）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框。
（5）屏蔽设计变量 Radius_1、Radius_2 和 Radius_3。
（6）单击 Next 按钮，进入 Define constraints 对话框。
（7）单击 Add constraint。
（8）单击 OK 按钮。
（9）在右上角的下拉菜单中，选择 Disp_35527。
（10）在 Bound Type <=中，设置其取值上限为 1。
（11）切换 Evaluate from Solver 为 MLSM _1。
（12）单击 Next 按钮，进入 Define Objective 对话框。
（13）单击 Add Objective。
（14）单击 OK 按钮。
（15）在 Apply On 中，选择 Volume。
（16）切换 Evaluate from Solver 至 MLSM _1。
（17）在 Objective 下拉菜单中选择 Minimize。
（18）单击 Add Objective。
（19）单击 OK 按钮。
（20）在 Apply On 下拉菜单中，选择 Max_Stress。
（21）切换 Evaluate from Solver 至 MLSM_1。
（22）在 Objective 下拉菜单中，选择 Minimize。
（23）单击 Launch optimization。
（24）优化迭代结束后，单击 Next 按钮进入 Post-processing 窗口。

STEP 10 查看迭代历程

（1）默认将提取 opt_1.hgres 文件。如果没有提取该文件，则用户可以在 Optimization

Iteration History Plot 面板下的 Optimization results plot file 中读取该文件。

（2）在每一栏中，包含了 Obj & Constr, DV,和 Responses 的相关信息。

（3）选中并查看迭代结果。

（4）选择 History 面板并单击 Visualize 按钮，HyperStudy 将打开优化后处理模块。

（5）查看 pareto front：在 x 轴中选择 Objective 2 (Max_stress)，在 y 轴中选择 Objective 1 (Volume)，结果如图 15-37 所示。

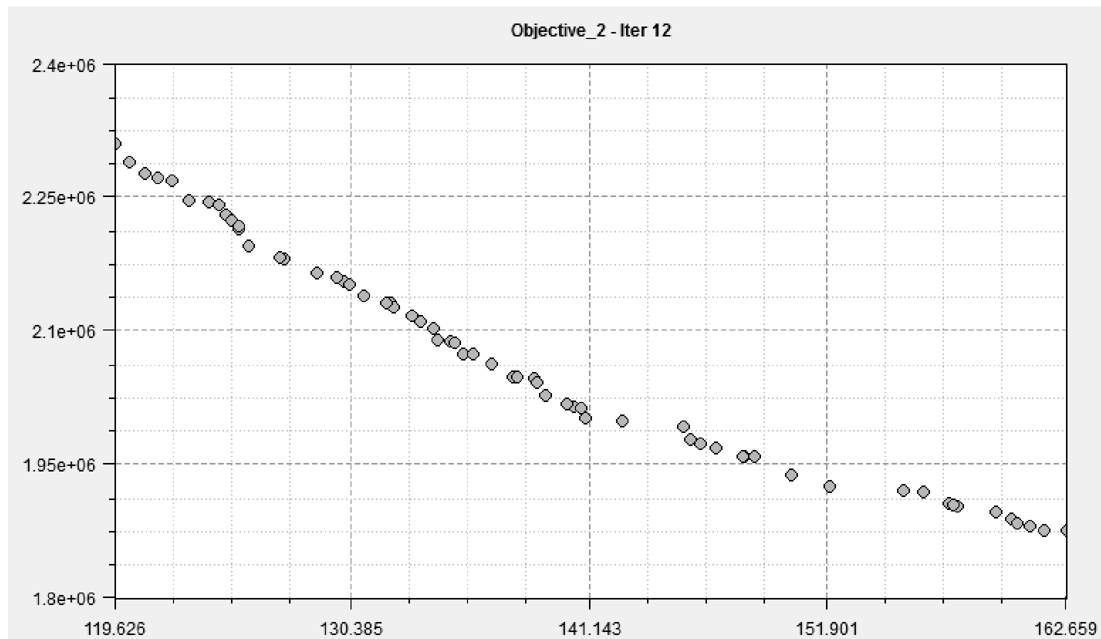


图 15-37　Pareto 面的优化解集

15.4　小结

通过本章的练习，读者应该对以下高阶应用有所了解：

✓ 对有限元模型的形状、尺寸参数化建模。
✓ 对材料模型的参数化建模。
✓ 基于有限元模型的筛选试验和结果解读。
✓ 基于有限元模型的响应面构造。
✓ 基于响应面的优化分析，并验证最优设计方案。
✓ 应用系统辨识技术标定给定材料模型的参数。
✓ 多目标优化以及对结果的解读。

第 16 章



MotionSolve 集成优化实例

MotionSolve 是 Altair HyperWorks 软件的模块之一，是新一代的多体动力学求解器。它采用创新的点辅助坐标系统（Point Auxiliary Coordinate System），具有计算更快速、更稳定的优点；提供了完整的多体动力学求解系列，可进行静力学、准静力学、运动学、动力学、模型线性化和状态矩阵输出等，实现大规模柔性系统仿真和机电液一体化仿真；适用范围广泛，可以处理机械系统动力学、车辆动力学、隔振、控制系统设计、针对耐久性分析的载荷预期和稳健性仿真等多方面的问题，可以对具有复杂非线性特性的模型进行仿真。

本章重点知识

16.1　实例：车辆悬架的试验设计
16.2　实例：车辆悬架的优化分析
16.3　小结

视化工具采用完全开放的程序架构，可以实现高度的流程自动化和客户化定制。MotionView 具有简洁友好的界面，高效的建模语言（MDL），同时也是第一款支持多求解器输出的多体动力学软件，可以将模型直接输出成 ADAMS 和 ABAQUS 等多种求解格式文件，或直接由 MotionSolve 求解。

HyperStudy 集成 MotionSolve 求解器进行优化设计需要通过 MotionView 用户界面进行。在 MotionView 用户界面中可以通过 Applications 下拉菜单选择 HyperStudy 进入 HyperStudy。在 HyperStudy 环境中可以选择 MDL 数据（如铰链点坐标、弹簧、衬套刚度等）作为 DOE 设计变量或优化参数，选择系统性能输出峰值或者曲线作为设计约束或者目标。通过 HyperStudy 界面还可以调用 MotionView 配置文件中已注册的求解器进行试验设计或优化分析。HyperStudy 分析流程如图 16−1 所示。

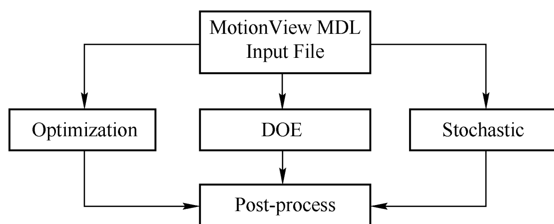


图 16−1　HyperStudy 分析流程

16.1　实例：车辆悬架的试验设计

本实例以前悬架为对象进行 DOE 研究，悬架静态平顺性（Static Ride Analysis）分析将研究内外拉杆球铰（inner and outer tie-rod joints）原有坐标变化对悬架性能的影响，具体内容包括以下几个方面：

- ✓ 使用 Hyperstudy 进行 MotionView 模型 DOE 设置。
- ✓ 在 MotionView-HyperStudy 环境中进行 DOE 分析。
- ✓ 创建 MotionView 模型近似方程（基于 DOE 结果）。

STEP 01 DOE 设置

（1）打开 MotionView。

（2）在工具栏中单击模型载入按钮，从工作目录中选择 hs.mdl。

（3）查看模型以及前束角曲线输出。

（4）从 Applications 下拉菜单中选择 HyperStudy，启动 HyperStudy。

（5）在 Create studies（创建研究）对话框中单击 Add Study 并选择 New。

（6）使用默认标题以及变量名，单击 OK 按钮。

（7）在 Study directory（研究目录）中，单击文件浏览按钮将文件目录定位在工作目录。

（8）单击 Next 按钮创建模型。

（9）在 Create models（创建模型）对话框中单击 Add Model。

（10）模型类型选择 MotionView。

（11）接受默认的变量名。

（12）单击 OK 按钮，此时 HyperStudy 界面将显示当前模型以及分析任务，如图 16−2 所示。

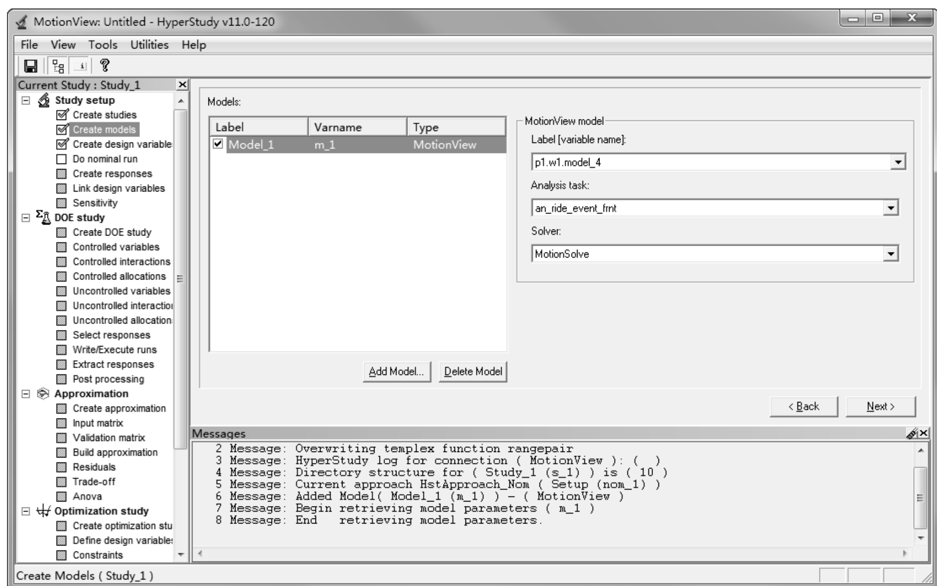


图 16-2 Create models 窗口

（13）单击 Next 按钮进入 Create Design Variables（创建设计变量）窗口。

（14）在 Create Design Variables 窗口中单击 Add Model Parameter（创建模型参数），将弹出模型树窗口。

（15）在模型树中选择下述参数并单击 Add 按钮：

System	Point	Coordinate
Front SLA susp.	Otr tie-rod ball-jt -left	Y
Front SLA susp.	Otr tie-rod ball-jt-left	Z
Parallel Steering	Inr tie-rod ball - left	Y
Parallel Steering	Inr tie-rod ball - left	Z

具体操作如图 16-3 所示。

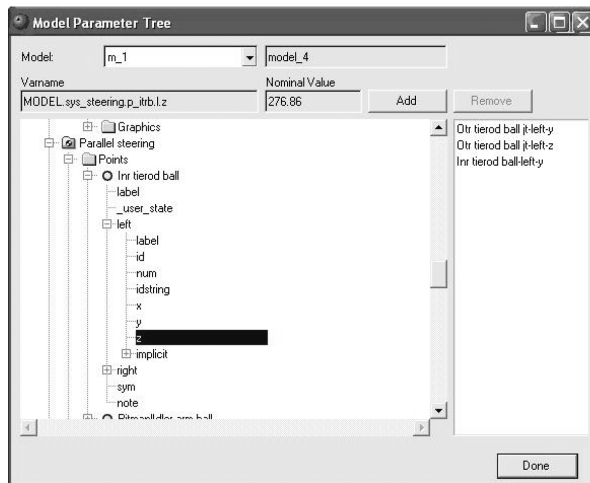


图 16-3 模型树窗口

（16）单击 Done 按钮。

（17）在设计变量属性窗口中，修改设计变量的最大、最小限值。第一个设计变量已经处在激活状态，单击设计变量列表的第一列激活不同的设计变量。

Point	Coordinate	Lower	Upper
Outer tie-rod ball-jt -left	Y	−571.15	−559.15
Outer tie-rod ball-jt - left	Z	246.92	250.92
Inner tie-rod ball - left	Y	−221.9	−209.9
Inner tie-rod ball - left	Z	274.86	278.86

（18）单击 Next 按钮进入 Do nominal run（初始运行）窗口。

（19）在 Solver input file 栏输入 m_1。

（20）选择 MotionSolve_Hst 作为 Solver Execution Script（求解执行脚本）。

（21）单击 Write/Execute 按钮。

此时，MotionSolve 根据上述设置后台求解。求解过程中注意 HyperStudy 与 MotionView 信息窗口中的内容。

（22）求解结束后，单击 Next 按钮，将弹出 Create response（创建响应）窗口。

（23）单击 Add Response 创建一个响应。

（24）响应类型选择为 Sum of Squared Error（误差平方和）。

（25）接受默认的变量名并单击 OK 按钮，此时 Expr Builder 处于可用状态。

（26）单击 Expr Builder，进入 HyperStudy 响应函数编辑对话框，如图 16−4 所示。

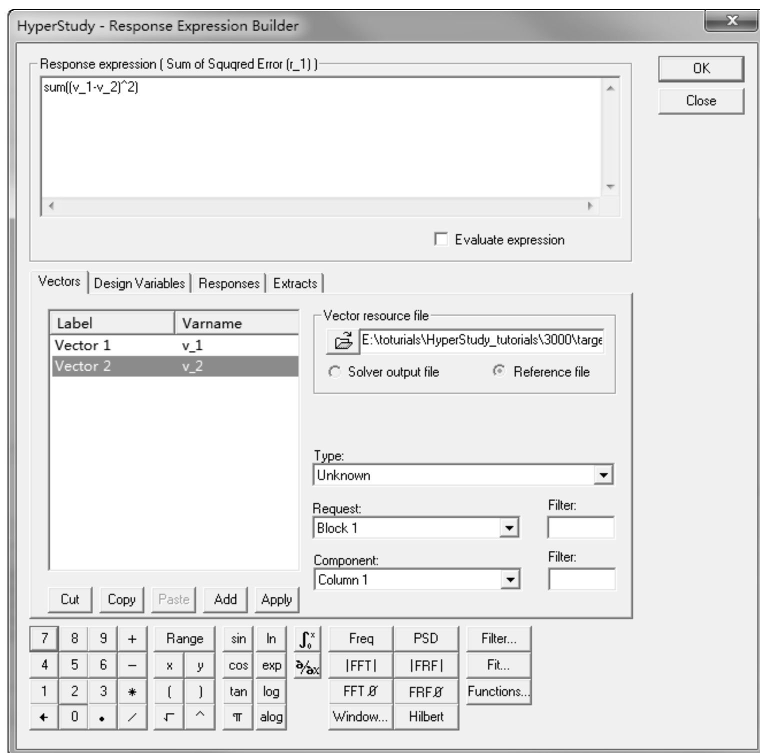


图 16−4　响应函数编辑对话框

本实例需要创建两个响应矢量：

✓ 响应矢量 1（Vector 1）包含从求解器获得的初始设置中实际前束角曲线点坐标。

✓ 响应矢量 2（Vector 2）包含目标前束角曲线点坐标。

（27）单击 Add 按钮，创建响应矢量 1，此时 Vector resource file（响应矢量源文件）窗口处于可用状态。

（28）单击响应矢量源文件窗口下的文件浏览按钮并从路径<working directory>\nom_run\m_1\中选择 m_1.abf。此时激活 Type、Request 和 Component 等区域。

（29）在 Type 栏中选择 Expressions。

（30）在 Request 栏中选择 REQ/70000033 toe-curve。

（31）选择分量 F2。

（32）单击 Apply 按钮，从求解器中获得的前束角曲线数据将作为响应矢量 1，接下来根据目标前束角曲线创建响应矢量 2。

（33）在 Vectors（响应）标签中单击 Add 按钮。

（34）在矢量源文件窗口下，单击文件浏览按钮并从工作路径中选择 target_toe.csv，弹出 Load Data Vectors 对话框。

（35）在 Load Data Vectors（矢量数据载入）对话框中的矢量数据类型处选择 Reference file。

（36）单击 Open 按钮。

（37）保持 Type 和 Request 分别为 Unkown 和 Block1 不变。

（38）在分量选择框中选择 Column1。

（39）单击 Apply 按钮。

（40）在响应函数栏中创建函数 sum((v_1-v_2)^2)。

（41）单击响应函数框中的 Evaluate（评估）按钮，确认函数表达式是否正确，此时函数返回值应是 16−2864。

（42）如果上述过程中没有出现错误信息，表示已经从初始运行中成功提取响应参数，然后单击 Evaluate 按钮取消选择响应函数评估。

（43）单击 OK 按钮返回响应创建对话框。

（44）单击 Next 按钮，此时进入 Link design variables（关联设计变量模块）。此模块可使用函数对设计变量进行数学处理，实现设计变量与当前研究的关联以进行 DOE、优化分析以及随机性研究。本例不需要关联设计变量。

（45）在 File 菜单中选择 Save Current Study As。

（46）在工作目录中将当前研究设置保存为 Setup.xml。

STEP 02 DOE 研究

（1）在 Sensitivity 窗口中单击 Continue To 按钮并选择 DOE Study。

（2）单击 Add DOE Study。

（3）接受默认的标题并单击 OK 按钮。

（4）选择 DOE 的 Controlled factors（可控因子）类型为 Fractional Factorial。

（5）本实例中所有的设计变量均为可控，因此在 Uncontrolled factors 栏中选择 None。

（6）单击 Next 按钮。

（7）在 Controlled variables（可控变量）对话框中确认 4 个设计变量均处于激活状态（即 On 栏均为选中状态）。

（8）单击 Next 按钮，进入 Controlled interactions（可控因子交互作用）对话框。可控因子交互作用对话框用来设置不同变量间的交互作用，如图 16-5 所示。

（9）确认激活所有的单选按钮以考查设计变量间所有的交互作用。可使用 All 按钮激活所有的交互作用。

（10）单击 Next 按钮，进入 Controlled allocations 对话框。

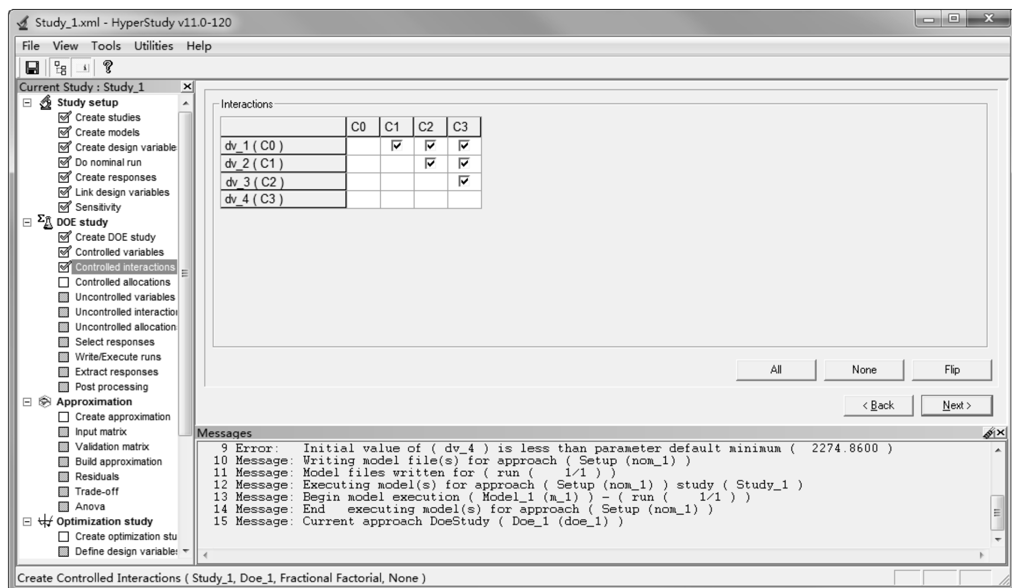


图 16-5　可控因子交互作用窗口

（11）在 Design 栏中选择 L16 设计矩阵。Allocations sub-panel（设计变量分配子面板）显示了设计变量根据设计矩阵的分配情况。整个设计矩阵描述了各个求解所使用的设计变量值。

（12）单击 Next 按钮。

本实例不考查不可控因子的影响，因此 Uncontrolled variables、Uncontrolled interactions 和 Uncontrolled allocations 窗口均为灰色不可用状态，此时窗口将直接转至 Select responses 对话框。

（13）确认当前响应是否为已创建的响应。

（14）单击 Next 按钮。

（15）在 Write/Execute runs 窗口中将看到分配好的设计变量值。单击 Write 按钮创建求解器输入文件，单击 Execute 按钮可调用求解器执行脚本求解上述创建的求解器输入文件。

（16）单击 Write/Execute 按钮开始求解。如果弹出是否希望以交互模式创建输入文件和提交求解窗口时，单击 Yes。此时，MotionSolve 启动并求解模型。

（17）求解结束后，单击 Next 按钮。

（18）在 Extract Responses（响应提取）对话框中，确认选择所有的求解结果。

（19）单击 Extract 按钮，此时 HyperStudy 将提取所有运行获得的响应值。

（20）单击 Next 按钮进入 Post processing（后处理）面板。Main Effects（主效应）标签

将显示各个可控因子对响应的作用，如图 16−6 所示。

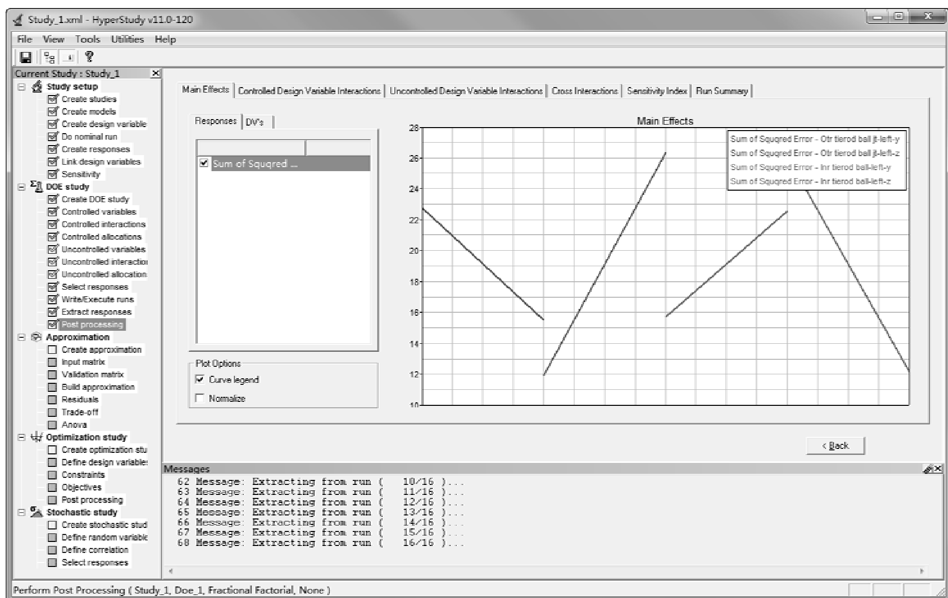


图 16−6 DOE−主效应图

（21）单击 Controlled Design Variable Interaction（可控因子交互作用）标签并选择已创建的响应。

（22）单击 DV’s 标签，选择一个交互作用，然后观察交互作用曲线。可控设计变量交互作用曲线显示了不同设计变量对响应的交互作用。如果交互曲线为平行线，表示当前显示的两个参数之间没有交互作用。

（23）观察变量 C1 和 C3 之间的交互曲线，如图 16−7 所示。

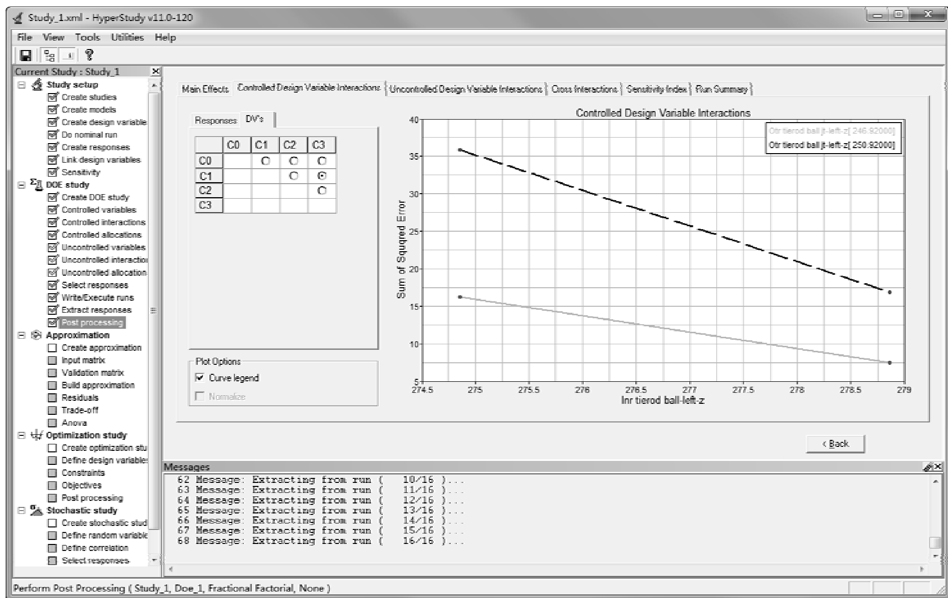


图 16−7 变量 C1 和 C3 之间的可控因子交互作用图

STEP 03 建立近似模型

（1）从 Sensitivity 窗口中单击 Continue to 并选择 Approximation。

（2）单击 Add 创建一个近似模型。

（3）在 Add Approximation 窗口中选择近似模型类型为 Moving Least Squares（移动最小二乘法）。

（4）单击 OK 按钮。

（5）单击 Next 按钮进入 Input Matrix（输入矩阵）对话框。

（6）单击 Import Matrix，然后在 Import DOE 窗口中单击 OK 按钮，输入 DOE 设计矩阵。

（7）单击 Next 按钮进入 Validation Matrix（验证矩阵）对话框。通过单击 Import Matrix 按钮可以输入验证矩阵（Validation matrix），本例不使用验证矩阵。

（8）单击 Next 按钮。

（9）在 Build Approximation 对话框中指定近似方程阶数为 1。

由于本实例设计变量水平为 2，因此创建的近似方程阶数指定为 1。如果研究中使用了多个水平的设计变量，就可以创建高阶的近似方程。

（10）单击 Build 按钮创建近似方程，具体图形界面如图 16-8 所示。

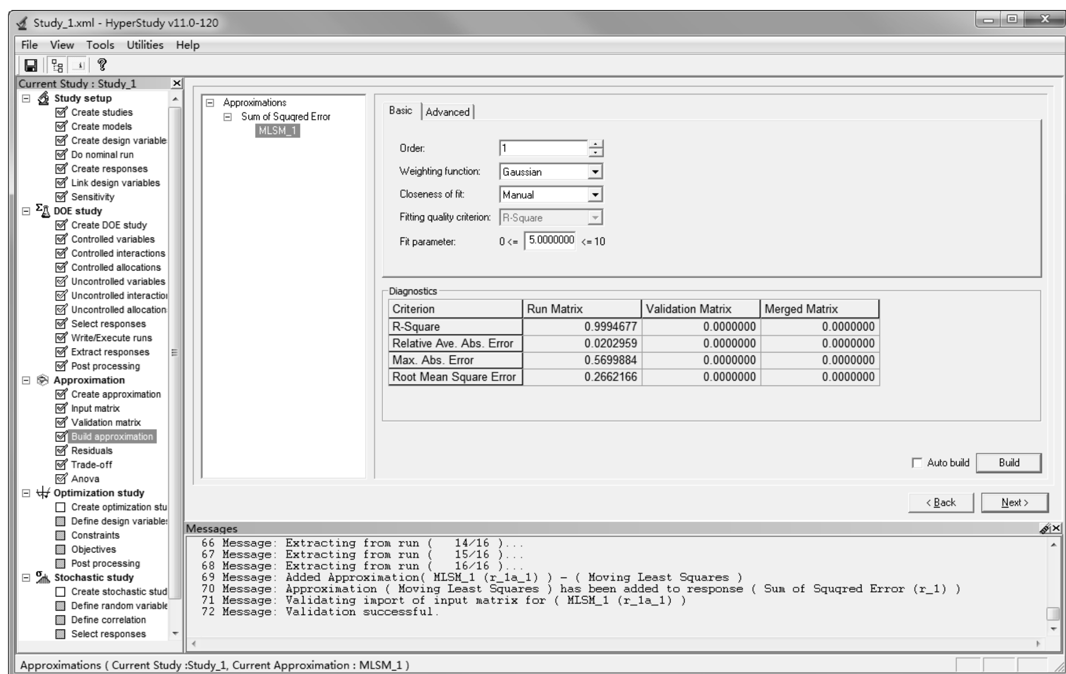


图 16-8　近似模型创建窗口

（11）单击 Next 按钮进入 Residual（残差）对话框。残差标签显示了从求解器获得的响应值与当前创建的回归方程获得的响应值之间的差异。残差图可以用来衡量基本假设与实际

模型之间的差异。

（12）单击 Next 按钮，Trade-off 对话框显示了近似模型中主效应与响应之间的关系。

（13）单击 3-D 标签，以三维视图的方式显示主效应与响应的关系，如图 16–9 所示。

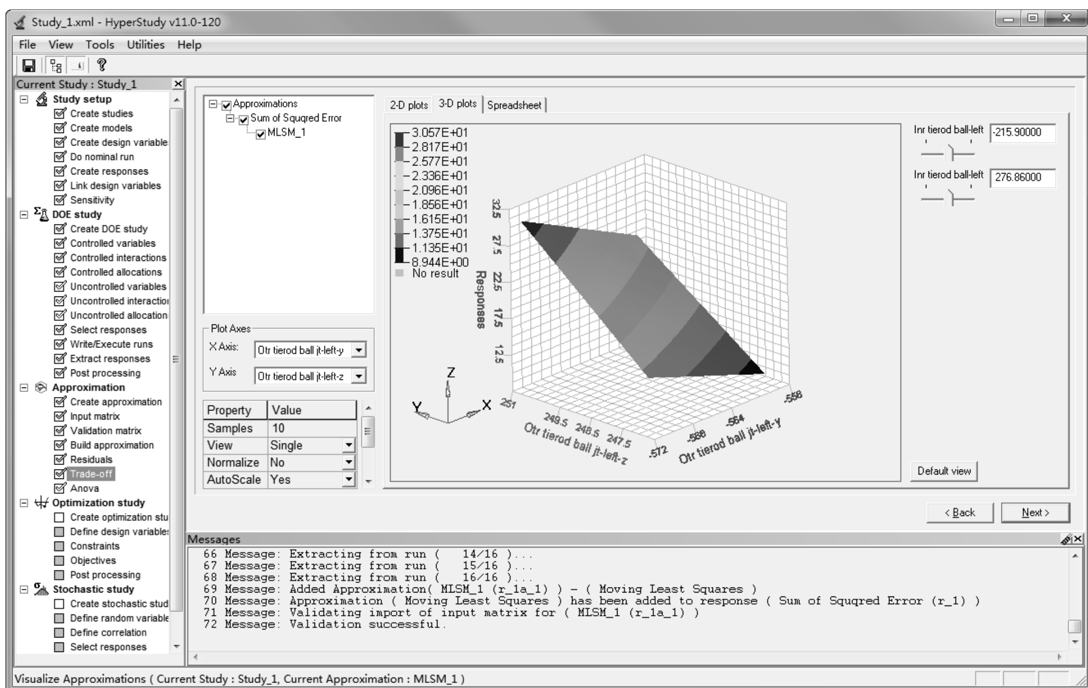


图 16–9　Trade-off 三维视图

（14）从 File 菜单中单击 Save Output Files。

（15）在 File Save Options 中选择 DOE 文件和近似模型文件并单击 Save 按钮，如图 16–10 所示。

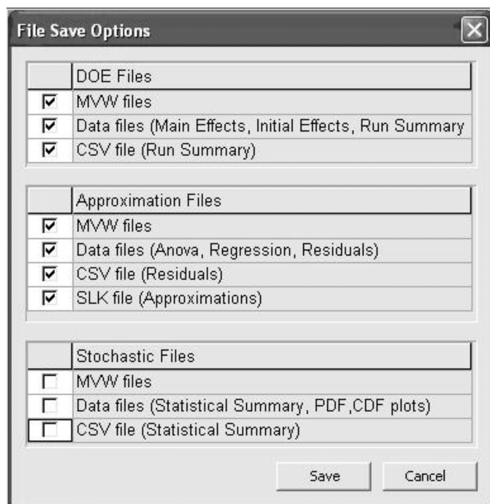


图 16–10　文件保存选项对话框

上述文件将保存在工作目录相应的文件夹下。

（16）在 File 菜单中选择 Save Current Study。

（17）在工作目录中保存当前研究为 Study_1.xml。

（18）在 File 菜单中，单击 Exit 按钮结束当前会话。

16.2 实例：车辆悬架的优化分析

本实例优化前悬架模型的铰链点以得到最佳的前束曲线，具体内容包括以下两个方面：

✓ 在 MotionView 和 HyperStudy 环境中进行优化分析。

✓ 原始模型与优化模型对比。

STEP 01 优化分析

（1）打开 MotionView。

（2）载入 hs.ml 模型。

（3）查看模型以及前束角曲线数据。

（4）在 SolverMode（求解器）菜单中选择 MotionSolve。

（5）在 Application 菜单中选择 HyperStudy。

（6）在 Create studies 对话框中单击 Add Study 并单击文件浏览按钮。

（7）选择实例 16.1 完成后保存的 Study_1.xml 文件。

（8）从 Sensitivity 面板中单击 Continue To 并选择 Optimization Study，进行优化分析设置。

（9）在 Create Optimization 对话框中单击 Add Optimization。

（10）接受默认的标题及变量名并单击 OK 按钮。

（11）接受默认的优化算法 Adaptive Response Surface Method（自适应响应面法），单击 Next 按钮。

（12）在 Define design variables 面板，确认选择所有的设计变量。

（13）此面板将显示所有的设计变量以及相应变量的最大、最小值。

（14）单击 Next 按钮。

（15）本实例中不需创建任何约束，所以单击 Constraints 对话框中的 Next 按钮进入 Objective 对话框。

（16）单击 Add Objective。

（17）接受默认的标题与变量名，已定义的响应显示在当前面板上，如图 16-11 所示。

本实例优化的目标是最小化响应函数均方误差和以获得设计参数（拉杆 Y 和 Z 坐标值）最优值。检查并确认 Evaluate From（评估目标）设置为 Solver。当前窗口可以设置最大迭代步以及收敛标准。

（18）单击 Launch Optimization，开始优化迭代。此时启动 MotionSolve 进行求解，优化引擎 HyperOpt 开始寻找目标最优值。

（19）优化迭代过程结束后，单击 Next 按钮进入后处理对话框。

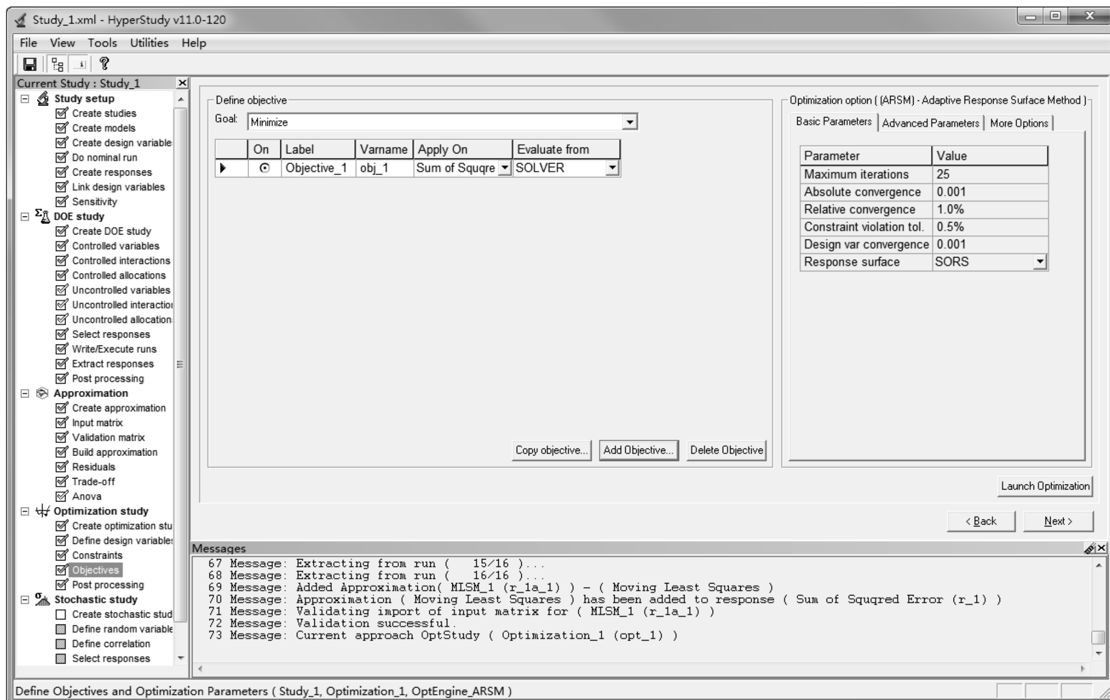


图 16–11　优化目标窗口

（20）单击 Optimization Iteration History Plot（优化迭代历程曲线），如图 16–12 所示。

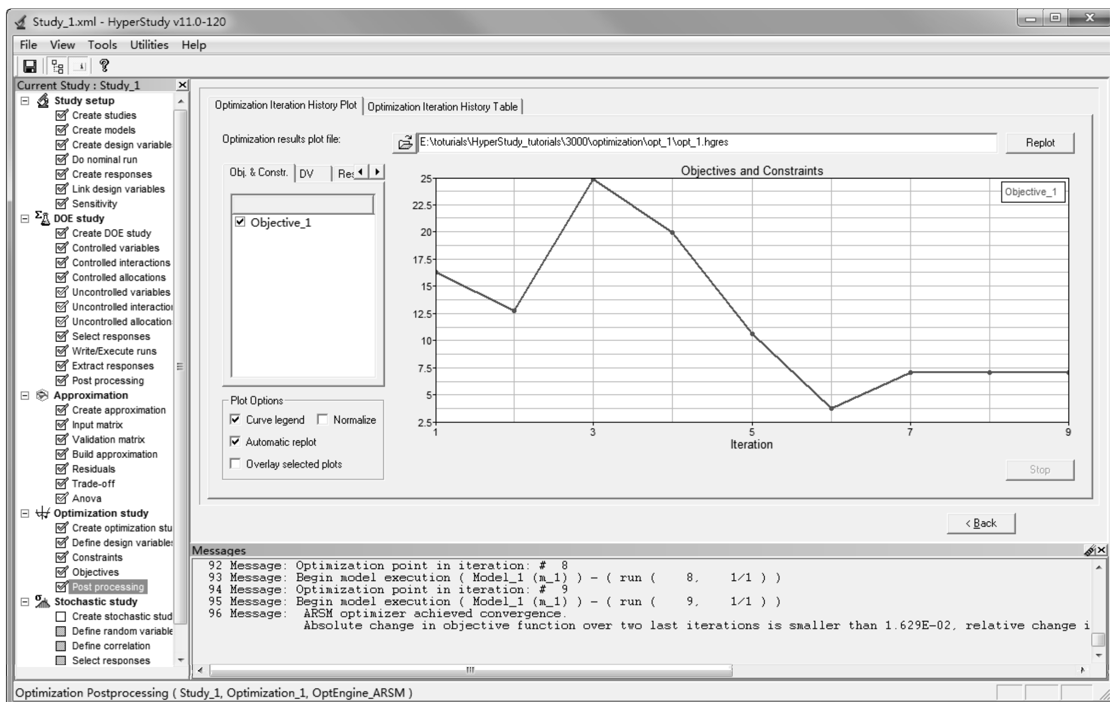


图 16–12　优化历程窗口

当前面板显示了不同迭代步中目标函数、约束、设计变量以及响应的变化情况。Optimization Iteration History Table（优化迭代历程表）以表格形式显示了上述数据。

注意，在本实例中，第 6 步迭代就找到了最优值。

（21）在工作目录中保存当前研究为 Study_2.xml。

STEP 02 对比原始模型与优化后的模型

（1）在 MotionView 界面中新增一页。

（2）在应用程序中选择 HyperView。

（3）在 Load Model 面板载入<working directory>\nom_run\m_1\m_1.h3d。

（4）单击工具栏中的页面布局按钮并选择两窗口布局。

（5）将第二个窗口的应用程序切换成 HyperGraph。

（6）单击工具栏中 Build Plots 按钮。

（7）在 Build Plots 面板中单击文件浏览按钮并选择<working directory>\basicd2\chapter3 路径下的 target_toe.csv。

（8）对于 X-axis，选择：

Type = Unknown

Request = Column 2

Component = Column 1

（9）对于 Y-axis，选择：

Type = Unknown

Request = Column 2

Component = Column 2

（10）单击 Apply 按钮。

（11）在 Build Plots 面板中单击文件浏览按钮，选择文件<working directory>\nom_run\m_1\m_1.abf。

（12）对于 X-axis，选择：

Type = Expressions

Request = REQ/70000033 toe-curve

Component = F2

（13）对于 Y-axis，选择：

Type = Expressions

Request = REQ/70000033 toe-curve

Component = F3

（14）单击 Apply 按钮。

（15）按照上述方法绘制文件<working directory>\optimization\opt_1\run6\m_1.abf 的曲线图。

本实例最后将获得图 16-13 所示的结果。在动画窗口可以载入优化后的模型动画以查看优化前后前束角曲线的差异。

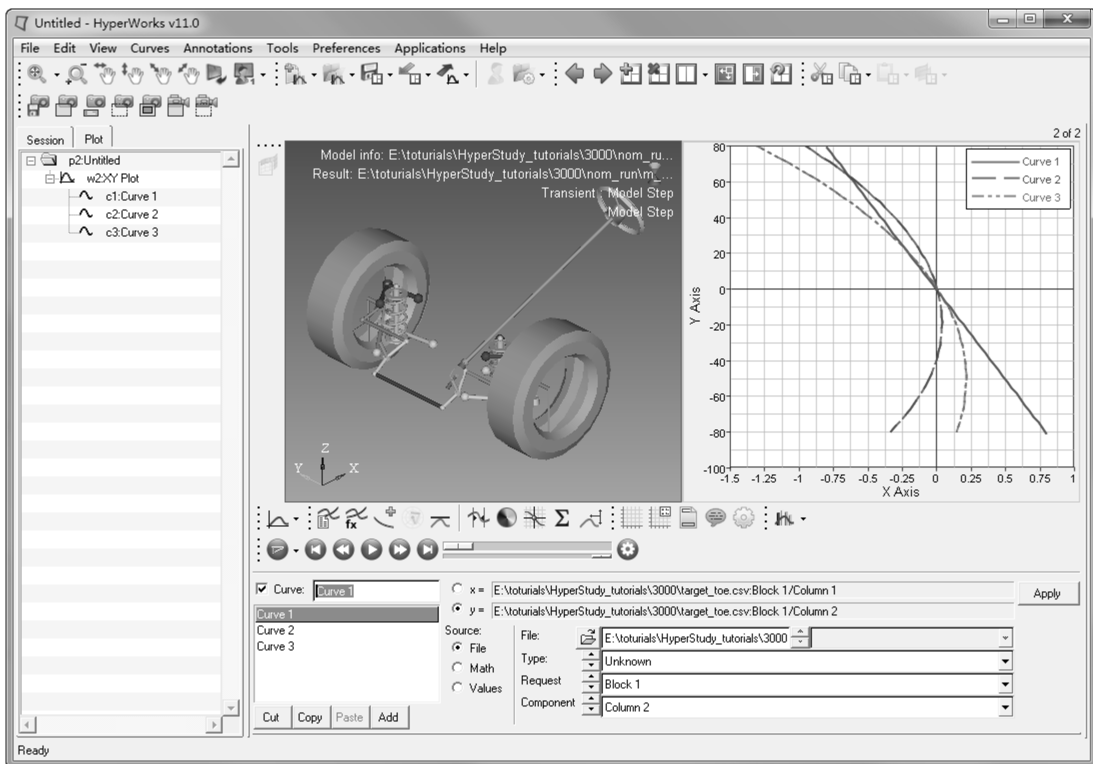


图 16-13　优化前后比较

16.3　小结

无缝集成 HyperStudy 进行运动机构性能优化设计，是 Altair 公司多体动力学解决方案的一大特色。MotionView 采用的 mdl 建模语言可完全参数化，并且可在模型树中方便选择各种设计参数。通过丰富的 MotionSolve 结果输出类型和文件读取接口，HyperStudy 可以方便地选定运动机构性能约束和目标，进行系统研究和优化设计。

第 17 章

HyperForm 集成优化实例



HyperForm 是 Altair HyperWorks 软件中专门用于板料冲压成形仿真的模块，可用于精确分析零件的冲压成形可行性和成形性，支持一步法和增量法两种仿真算法。

HyperStudy 可以集成到 HyperForm 中进行广泛的冲压成形优化设计，特别是通过形状优化技术调整零件形状或者加强筋样式，从而提高成形性能或者力学性能等。

本章通过 3 个实例来演示 HyperForm 与 HyperStudy 的集成优化技术，部分操作需要对 HyperMesh 的网格划分和网格变形功能比较熟悉，可参考本书的 HyperMesh 章节。

本章重点知识

17.1　实例：基于 HyperMesh 界面的冲压零件形状优化
17.2　实例：基于 HyperForm 界面的冲压零件形状优化
17.3　实例：冲压零件的工艺和形状优化
17.4　小结

17.1　实例：基于 HyperMesh 界面的冲压零件形状优化

本实例展示了如何分别通过 HyperMesh 界面和 HyperStudy 来实现冲压成形零件的形状优化。模型的参数化都是通过输入模板来完成。形状变量是在 HyperMesh 的 RADIOSS（Bulk Data）环境下创建的。在输出参数化形状变量之后，还需要建立一个基于 HyperForm 输入格式的模板文件。

优化的目标是保证在冲压成形过程中所有单元的厚度变化（减薄率、厚向应变）最小如图 17-1 所示。设计变量为零件横截面的圆角半径。优化过程中使用对称模型，优化类型为形状优化。

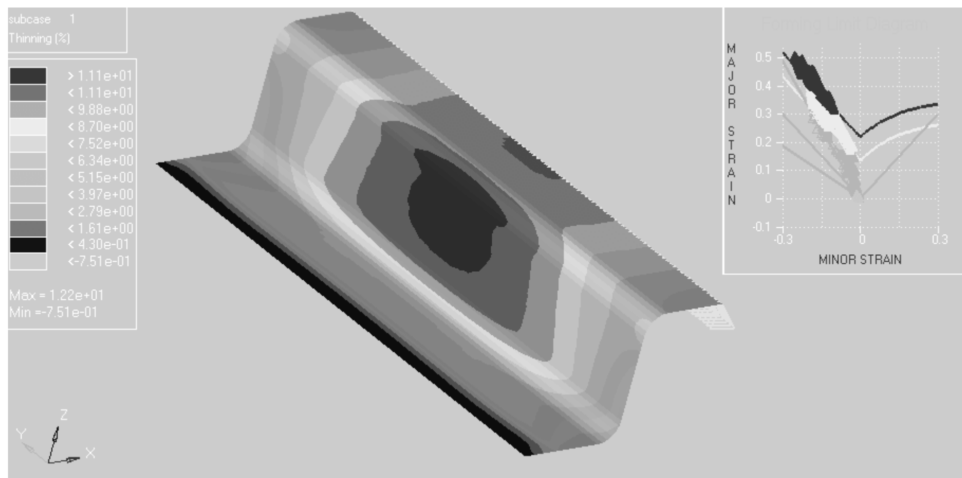


图 17-1　减薄率云图

STEP 01　在 HyperMorph 中完成形状的参数化

（1）运行 HyperMesh，选择 Preferences 中的 User Profiles。
（2）选择 RADIOSS（Bulk Data Format）。
（3）打开菜单 File 中的 Open。
（4）加载模型文件 hat.hf。
（5）切换到 Analysis 页面。
（6）单击 Optimization。
（7）选择 HyperMorph。
（8）单击 domains，打开定义 domain 的面板。
（9）单击 partitioning。
（10）输入 curve tolerance=5.000。
（11）单击 create 按钮将页面切换到创建页面。
（12）选择 auto functions。

（13）单击 generate，生成控制网格形状的 domains 和 handles，如图 17-2 所示。
（14）单击 return 按钮。

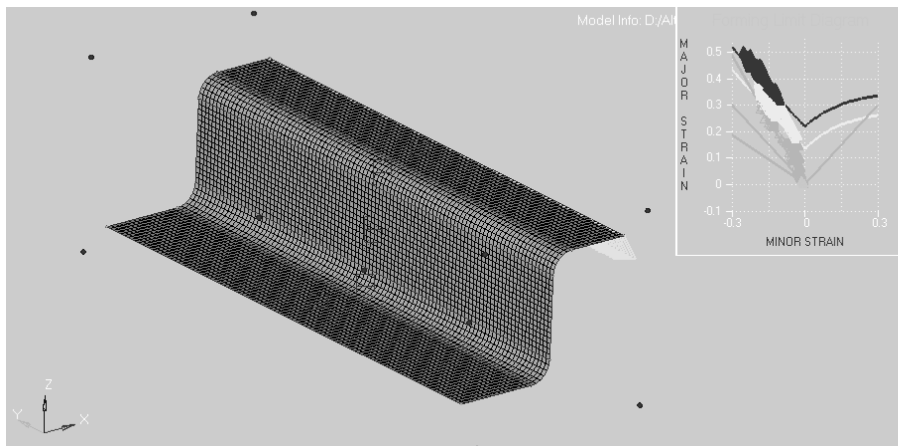


图 17-2　domain 和 handle 示意图

（15）单击 morph，定义两个代表圆角半径的设计变量。
（16）选择 alter dimensions。
（17）将上面的选择器设置为 radius=。
（18）下面的选择器设置为 fillet=。
（19）选择两个曲边 domains 和 2-D domain。
（20）设置 radius=2.0000。
（21）单击 morph，生成第一个形状变量如图 17-3 所示。

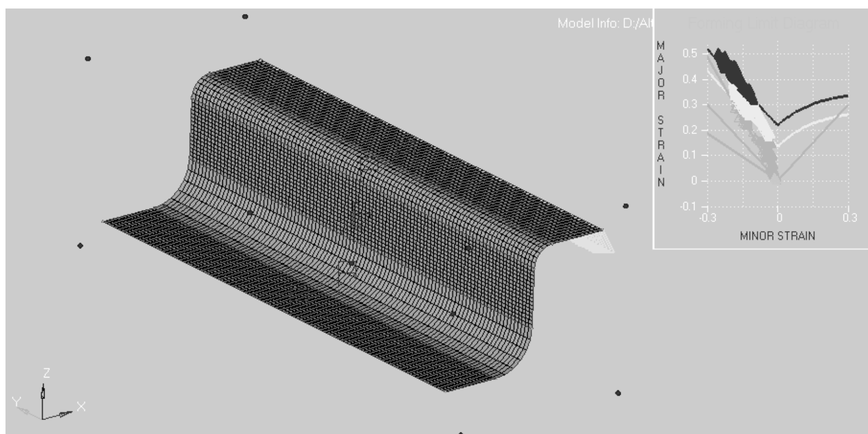


图 17-3　第一个形状变量

（22）切换到 save shape 页面。
（23）输入第一个形状的名称 shape=sh1。
（24）单击 Save 按钮。
（25）单击 undo，准备生成第二个形状。

（26）选择 alter dimensions。
（27）将上面的选择器设置为 radius=。
（28）将下面的选择器设置为 fillet=。
（29）单击重置按钮。
（30）选择两个曲边 domains 和 2D domain。
（31）输入 radius=2.0000。
（32）单击 morph，生成第二个形状。
（33）切换到 save shape 页面。
（34）输入第二个形状的名称 shape=sh2。
（35）单击 Save 按钮。
（36）单击 undo。
（37）单击两次 return 按钮，回到 Analysis 页面。
（38）将模型保存为 hatDV.hm。

STEP 02 通过 HyperMesh 输出参数化的形状文件

（1）在 Analysis 面板中，单击 Optimization。
（2）选择 shape 面板。
（3）激活 desvar，确保 multiple desvar 为当前选项。
（4）单击 shape。
（5）选择前面定义的两个形状。
（6）单击 return 按钮。
（7）单击 create 按钮，生成所选形状的形状变量。用户可以通过单击 animate 来动态显示形状的变化。
（8）单击 return 按钮，回到 shape 面板。
（9）单击 export。
（10）选择 analysis code：HyperStudy，sub-code：HyperForm。
（11）确认输出名为 hatDV.shp。
（12）单击 export as。
（13）单击 Save 按钮。
（14）单击两次 return 按钮，回到初始页面。至此，已经生成了 hatDV.hyperform.node.tpl 和 hatDV.shp 两个文件。

STEP 03 在 HyperStudy 中创建输入模板

（1）运行 HyperStudy。HyperStudy 可以单独运行，也可以在 HyperMesh 中通过 Application 下拉菜单来运行。
（2）在 HyperStudy 的操作环境下，选择 Tools 菜单，单击 Create Template。

（3）单击 File 中的 import，导入 hat.parm 文件。

（4）进入第一个 GRID 卡片。

（5）选中整个 GRID 卡片的内容。

（6）单击鼠标右键，选择 Shape Template 打开文件选择窗口。

（7）选择 hatDV.hyperform.node.tpl。

（8）单击 Open 按钮。

（9）当 Design Variables Properties 窗口打开时，单击 OK 按钮。

（10）单击 File 中的 Export as，输出 hat.tpl 文件。

（11）关闭 Create Template 窗口。

另外一种在 HyperStudy 中创建输入模板的方法如下：

（1）运行 HyperStudy。HyperStudy 可以单独运行，也可以在 HyperMesh 中通过 Application 下拉菜单来运行。

（2）在 HyperStudy 的操作环境下，选择 Utilities 菜单，单击 Editor。

（3）在 Editor 中选择 File 中的 Open，打开 hat.parm 文件。

（4）选择所有的 GRID 行。

（5）单击鼠标右键，选择 Shape Template。

（6）选择 hatDV.hyperform.node.tpl。

（7）单击 Design/Show Templete。

（8）单击 File 中的 Save，输出 hat.tpl 文件。

STEP 04 设置 study 并进行初始计算

（1）单击 Add Study。

（2）选择 New，打开 Add Study 窗口。

（3）单击 OK 按钮。

（4）选择本实例的工作目录为 Study directory。

（5）单击 Next 按钮。

（6）单击 Add model。

（7）单击 OK 按钮。一个新的 model 出现在列表中。

（8）选择 Template 文件。

（9）选择 hat.tpl 文件。

（10）单击 Open 按钮。

（11）单击 Next 按钮。

（12）选择第一行，包含 Sh1 变量。

（13）在 Lower bound 中输入-1.5。

（14）在 Upper bound 中输入 1.5。

（15）选择第二行，包含 Sh2 变量。

（16）重复步骤（13）和（14）的输入。

（17）单击 Next 按钮，进入 Do nominal run 设置窗口。

（18）在 Solver input files 中输入 hat.parm。

（19）从 Solver execution script 下拉菜单中选择 RADIOSS。

（20）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮。这时，在当前的 Study directory 下，自动创建一个 nom_run/m_1 的目录。其中，hat.dat 包含所需的成形极限图 FLD 信息，每个单元的厚度变化向量也可以从这个文件中导出。

（21）单击 Next 按钮打开 Create responses 面板。

STEP 05 创建响应

（1）单击 Add Response。

（2）单击 OK 按钮。

（3）单击 Response_1。

（4）单击 Expr Builder，打开 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口。

（5）在 Vector 栏中单击 Add 按钮，自动创建名为 Vector 1 的向量。

（6）单击 Vector resource 中的文件选择按钮，选择 hat.dat 文件。

（7）按照下面的参数来定义表征厚向应变的 Vector 1 向量。

Type：HyperForm Results

Request：FLD

Component：Thickness Strain

（8）单击 Functions。

（9）选择 sum。

（10）单击 OK 按钮。

（11）单击 Apply 按钮，向量将会加入到 Expression 中。

（12）单击 Evaluate response expression，这时 sum(v_1)显示为 38796.3。

（13）单击 OK 按钮。

STEP 06 进行优化计算

（1）在导航树中单击 Create optimization。

（2）单击 Add optimization。

（3）在窗口的右上角选择 Optimization Engine: (ARSM)-Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮，打开 Design Variables 对话框。

（5）单击 Next 按钮，打开 Define constraints 对话框，本实例中不需要定义 constraints。

（6）单击 Next 按钮，打开 Define objective 对话框。

（7）单击 Add objective。

（8）单击 OK 按钮。

（9）从 Apply On 的下拉列表中选择 Response_1。

（10）在 Objective 下拉列表中选择 Minimize。

（11）在 Relative Convergence 中输入 0.1，保持其他参数不变。

（12）单击 Launch optimization。

STEP 07 查看优化的迭代历程

（1）进入 HyperStudy 的 Post-processing 窗口，这时\optimization\opt_1\opt_1.hgres 文件将自动加载进来。用户可以查看 Obj & Constr., DV, and Responses 等信息。

（2）单击任意一个选项，查看相关迭代历程。

17.2 实例：基于 HyperForm 界面的冲压零件形状优化

本实例展示了如何通过 HyperForm 和 HyperStudy 的协同来完成冲压件的形状优化。优化的目标是保证在冲压成形过程中所有单元的厚度变化（减薄率、厚向应变）最小，如图 17-4 所示。设计变量为零件横截面的圆角半径。优化过程中使用对称模型，优化类型为形状优化。

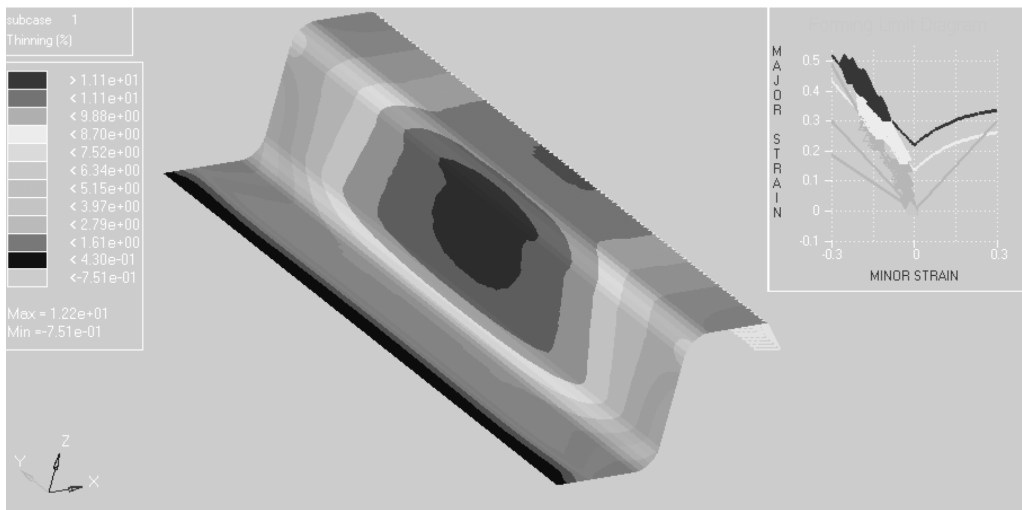


图 17-4 减薄率云图

STEP 01 在 HyperMorph 中完成形状的参数化

（1）从 Start 菜单中选择 Manufacturing Solutions 中的 HyperForm 来启动 HyperForm。

（2）选择 HyperForm Radioss_One_Step 用户环境。

（3）选择 File 中的 Open，打开 hat.hf 文件。

（4）单击 View 下拉菜单中选择 Panels，单击 HypeMorph。

（5）单击 domains，打开定义 domain 的面板。

（6）单击 partitioning。

（7）输入 curve tolerance=5.000。

（8）单击 create 按钮将页面切换到创建页面。

（9）选择 auto functions。

（10）单击 generate，生成控制网格形状的 domains 和 handles，如图 17-5 所示。

（11）单击 return 按钮。

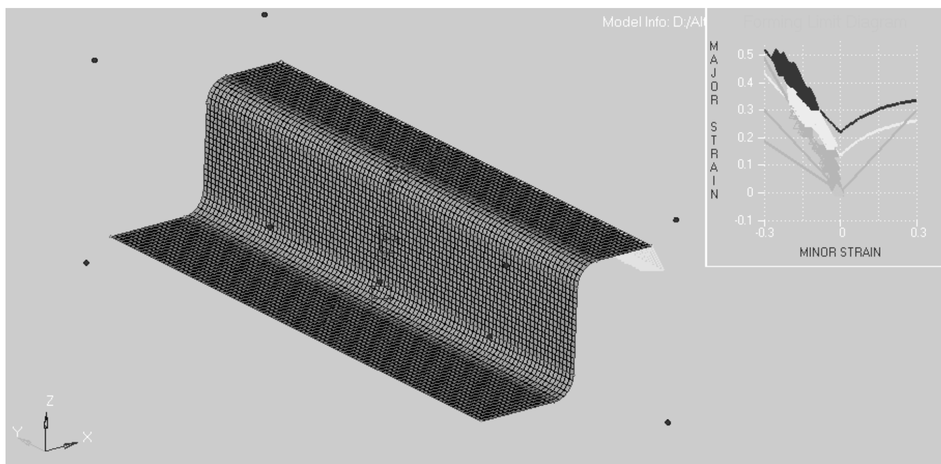


图 17-5　domain 和 handle 示意图

（12）单击 morph，定义两个代表圆角半径的设计变量。

（13）选择 alter dimensions。

（14）将上面的选择器设置为 radius=。

（15）将下面的选择器设置为 fillet=。

（16）选择两个曲边 domains 和 2-D domain。

（17）设置 radius=2.0000。

（18）单击 morph，生成第一个形状变量如图 17-6 所示。

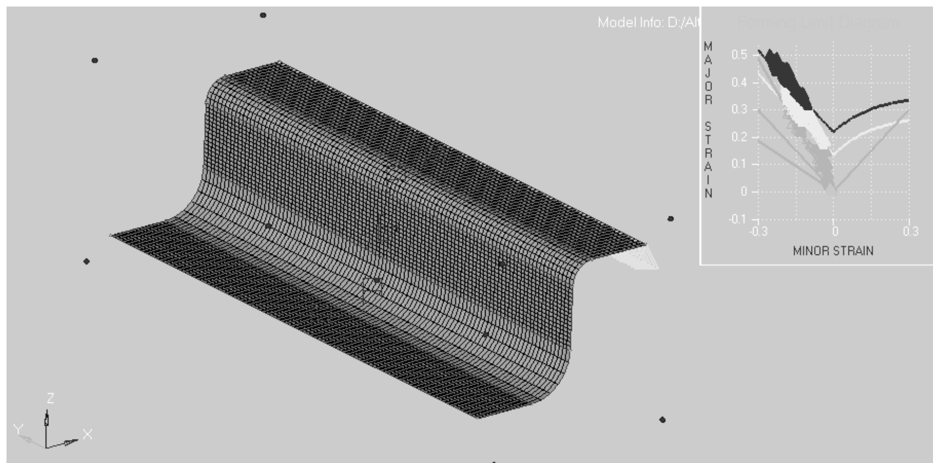


图 17-6　第一个形状变量

（19）切换到 save shape 页面。
（20）输入第一个形状的名称 shape=sh1。
（21）单击 Save 按钮。
（22）单击 undo，准备生成第二个形状。
（23）选择 alter dimensions。
（24）将上面的选择器设置为 radius=。
（25）将下面的选择器设置为 fillet=。
（26）单击重置按钮。
（27）选择两个曲边 domains 和 2D domain。
（28）输入 radius=2.0000。
（29）单击 morph，生成第二个形状。
（30）切换到 save shape 页面。
（31）输入第二个形状的名称 shape=sh2。
（32）单击 Save 按钮。
（33）单击 undo。
（34）单击 return 按钮。
（35）将模型保存为 hatDV.hf。

STEP 02 运行 HyperStudy

（1）单击 Applications 下拉菜单。
（2）选择 HyperStudy，打开 HyperStudy 软件界面。

STEP 03 设置 HyperStudy 参数

（1）单击 Add study。
（2）选择 New，打开 Add Study 对话框。
（3）单击 OK 按钮。
（4）指定 Study directory 为本实例的工作目录。
（5）单击 Next 按钮打开 Create models 窗口。
（6）单击 Add model。
（7）选择 Model type 为 HyperMesh。
（8）单击 OK 按钮。
（9）单击 Next 按钮，打开 Design Variables 对话框。
（10）单击 Add Model Parameter。
（11）单击左侧模型树中的 Shape。
（12）双击选择前面定义的两个形状 sh1.S 和 sh2.S。
（13）单击 OK 按钮。

（14）选择第一行，包含所有和 sh1.S 有关的信息。
（15）在 Lower bound:中输入-1.5。
（16）在 Upper bound:中输入 1.5。
（17）选择第二行，包含所有和 sh2.S 有关的信息。
（18）重复步骤（15）和（16）。
（19）单击 Next 按钮，打开 Do nominal run 窗口。
（20）在 Solver input Files 中输入 hat.parm。
（21）从 Solver execution script 下拉列表中选择 RADIOSS，不需要修改 Solver input arguments。

STEP 04 初始计算

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮。
（2）这时，在当前的 Study directory 下自动创建一个 nom_run/m_1 的目录。其中，hat.dat 包含所需的成形极限图 FLD 信息，每个单元的厚度变化向量也可以从这个文件中导出。
（3）单击 Next 按钮，打开 Create responses 面板。

STEP 05 创建响应

（1）单击 Add Response。
（2）单击 OK 按钮。
（3）单击 Response_1。
（4）单击 Expr Builder，打开 HyperStudy - Response Expression Builder 窗口。
（5）在 Vector 栏中单击 Add 按钮，自动创建名为 Vector 1 的向量。
（6）单击 Vector resource 中的文件选择按钮，选择 hat.dat 文件。
（7）按照下面的参数来定义表征厚向应变的 Vector 1 向量。
Type：HyperForm Results
Request：FLD
Component：Thickness Strain
（8）单击 Functions。
（9）选择 sum。
（10）单击 OK 按钮。
（11）单击 Apply 按钮，向量将会加入到 Expression 域。
（12）单击 Evaluate response expression，这时 sum(v_1)显示为 38796.3。
（13）单击 OK 按钮。

STEP 06 进行优化计算

（1）在导航树中单击 Create optimization。

（2）单击 Add optimization。

（3）在窗口的右上角选择 Optimization Engine: (ARSM) - Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮，打开 Design Variables 对话框。

（5）单击 Next 按钮，打开 Define constraints 对话框，本实例中不需要定义 constraints。

（6）单击 Next 按钮，打开 Define objective 对话框。

（7）单击 Add objective。

（8）单击 OK 按钮。

（9）从 Apply On 的下拉列表中选择 Response_1。

（10）在 Objective 下拉列表中选择 Minimize。

（11）在 Relative Convergence 中输入 0.1，保持其他参数不变。

（12）单击 Launch optimization。

STEP 07 查看优化的迭代历程

（1）进入 HyperStudy 的 Post-processing 窗口，这时 opt_1.hgres 文件将自动加载进来。用户可以查看 Obj & Constr., DV, and Responses 等信息。

（2）单击任意一个选项，查看相关迭代历程。

17.3 实例：冲压零件的工艺和形状优化

本实例展示了如何通过 HyperForm 和 HyperStudy 的协同来完成 RADIOSS One-Step 成形仿真零件的优化分析。

冲压工艺的优化通常要考虑大量的形状和工艺设计变量。工艺变量通过 HyperForm 来设置，形状变量则由 HyperMorph 来完成。本实例使用的冲压仿真求解器为 RADIOSS One-Step，同样，也可以把这个应用扩展到 RADIOSS 的 Incremental 求解器。

根据最小化冲压过程中的起皱和开裂缺陷所对应的成形极限图 FLD 中的可成形区域的最大和最小应变率，定义了 quality function。优化的目标函数 objective function 通过最小化 quality function 曲线与 FLD 中每一点的距离来实现。成形极限图如图 17-7 所示。

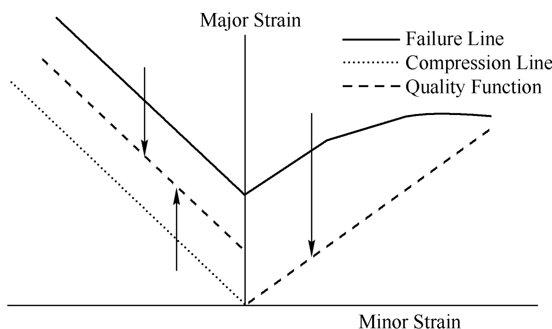


图 17-7　成形极限图

所涉及的形状变量包括板料的轮廓线、模具入口处的圆角半径、零件的冲压深度，工艺参数包括压边力和虚拟拉延筋的阻力，如图 17-8 所示。

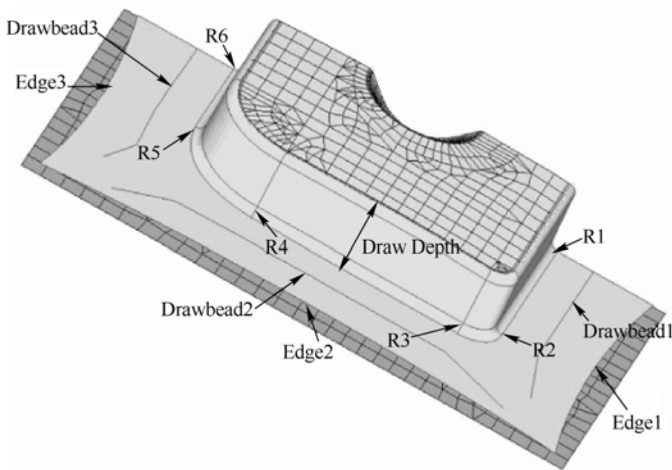


图 17-8　变量示意图

STEP 01 设置 HyperStudy 参数

（1）从 Start 菜单中选择 Manufacturing Solutions 下的 HyperForm 启动 HyperForm。
（2）选择 HyperForm Radioss_One_Step 用户环境。
（3）选择 File 中的 Open，打开 part1b_opti.hf 文件。
（4）从 Applications 下拉菜单中选择 HyperStudy。
（5）单击 Add study。
（6）选择 New，打开 Add Study 对话框。
（7）单击 OK 按钮。
（8）指定 Study directory 为本实例的工作目录。
（9）单击 Next 按钮打开 Create models 窗口。
（10）单击 Add model。
（11）选择 Model type 为 HyperMesh。
（12）单击 OK 按钮。
（13）单击 Next 按钮，打开 Create Design Variables 对话框。
（14）单击 Add Model Parameter，弹出 Model Parameter 对话框。
（15）打开模型树中的 Shape、Drawbead 和 Blankholder。
（16）选择所有的形状变量、拉延筋阻力和单位压边力。
（17）单击 Add 按钮。
（18）单击 OK 按钮。
（19）选择每一个包含形状变量的行。
（20）在所有的形状变量 Lower bound 中输入-1.0。

（21）所有的形状变量 Upper bound 中输入 1.0。

（22）选择所有包含拉延筋阻力和单位压边力的行。

（23）重复步骤（19）和（20），在 Lower bound 中输入 0.0，在 Upper bound 中输入 200。

（24）单击 Next 按钮，打开 Do nominal run 窗口。

（25）在 Solver input file 中输入 part1b_opti.parm。

（26）在 Solver execution script 下拉列表中选择 RADIOSS。

STEP 02 初始计算

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮。

（2）这时，在当前的 Study directory 下自动创建一个 nom_run/m_1 的目录。目标函数包含在 part1b_opti_opt.dat 文件中，约束可以从 part1b_opti.dat 中获得。

（3）单击 Next 按钮，打开 Create responses 面板。

STEP 03 创建响应

（1）定义一个和目标函数相关的响应。

✓ 单击 Add Response。

✓ 单击 OK 按钮。

✓ 单击 Response_1。

✓ 单击 Expr Builder，打开 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口。

✓ 在 Vector 栏中单击 Add 按钮，自动创建名为 Vector 1 的向量。

（2）定义 Vector 1 的具体内容。

✓ 单击 Vector resource 中的文件选择按钮，选择 part1b_opti_opt.dat 文件。

✓ 按照下面的参数来定义表征厚向应变的 Vector 1 向量。

Type：HyperForm Results

Request：FLD

Component：Distance 1

✓ 单击 Apply 按钮。

✓ 单击 Expression，输入 sum (v_1*v_1)。

✓ 选择 Evaluate response expression。

✓ 这时显示出表达式 sum (v_1*v_1)的具体数值。

✓ 单击 OK 按钮。

（3）创建一个基于约束的响应。

✓ 重复前面的步骤创建第二个响应 Response_2 和 Vector 2。

✓ 单击 Vector resource file 选择 part1b_opti.dat 文件。

✓ 按照下面的参数来定义表征厚向应变的 Vector 2 向量。

Type：HyperForm Results

Request：FLD

Component：Thickness Strain

✓ 单击 Apply 按钮。

✓ 单击 Expression，输入 mean(sort(1,v_2)[0:49:1]。

这个表达式包含以下含义：

按降序的方式对所有单元的厚度排序。

提取前 50 个值。

计算它们的均值。

✓ 选择 Evaluate response expression。

✓ 这时显示出表达式 mean(sort(1,v_2)[0:49:1]的具体数值。

✓ 单击 OK 按钮。

STEP 04 进行优化计算

（1）单击 Continue to，选择 Optimization study。

（2）单击 Add Optimization。

（3）选择(ARSM) Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 OK 按钮。

（5）单击 Next 按钮，打开 Design Variables 对话框。

（6）单击 Next 按钮，打开 Constraints 对话框。

（7）单击 Add constraint。

（8）单击 OK 按钮。

（9）在 Apply constraint on 选项中选择 Response_2。

（10）单击 Less than，输入 25。这个数值表明，成形过程中拉伸最严重的区域的平均厚向应变应该小于 25%，这一约束可以保证使用整体未约束模型来建立的 objective function，不会导致局部缺陷。

（11）单击 Next 按钮，打开 Define objective 窗口。

（12）单击 Add objective。

（13）单击 OK 按钮。

（14）在 Apply on 选项中选择 Response_1。

（15）在 Objective 选项中选择 Minimize。

（16）将 Maximum number of iterations 设置为 50。其他参数不需要修改。

（17）单击 Launch optimization 来提交计算任务。

（18）HyperStudy 自动进入 Post-processing 窗口。

STEP 05 查看优化的迭代历程

（1）opti_1.hgres 文件将自动加载进来。

（2）用户可以查看 Obj & Constr, DV, 和 Responses 等信息。

（3）单击任意一个选项，查看相关迭代历程。

STEP 06 查看优化结果

（1）打开 opti_1.hyperopt 文件，从工作目录中找到和优化步骤相关的迭代目录。

（2）打开 HyperForm 导入这个迭代目录下的 part1b_opti.parm 文件。

（3）将这个文件保存成 HyperForm 的数据文件。

（4）打开 run analysis 面板，选择 load results。

（5）单击 create fld plots，比较其和初始结果的差异。

17.4 小结

冲压成形的零件形状和工艺参数的优化设计可以通过 HyperStudy 和 HyperForm 的集成优化来实现。对于实际的工程项目，合理创建形状变化、选择设计参数和设计变量的上/下限等很重要，需要实际工程经验的指导。

第 18 章

其他求解器集成优化实例



HyperStudy 是独立于求解器的中立的优化设计引擎，可以同各种主流 CAE 求解器进行集成，通过模型文件和结果文件的接口交互，实现各种 CAE 分析类型的研究和优化。

HyperStudy 可以通过两种方式同其他求解器实现集成：

✓ 通过 HyperMesh 的文件接口进行优化问题建模。

✓ 对现有模型文件进行直接参数化。

本章将通过实例演示 HyperStudy 同其他求解器（包括 LS-Dyna、ANSYS、Abaqus、Madymo、Fluent、AcuSolve）进行集成优化的具体过程。

本章重点知识

18.1 实例：集成 LS-Dyna 的尺寸优化
18.2 实例：集成 ANSYS 的形状优化
18.3 实例：集成 Abaqus 的形状优化
18.4 实例：集成 Madymo 的 DOE 分析
18.5 实例：集成 FLUENT 的 DOE 分析和优化研究
18.6 实例：集成 AcuSolve 的 DOE 分析
18.7 小结

18.1 实例：集成 LS-Dyna 的尺寸优化

本实例将演示使用 HyperStudy 作为优化引擎，驱动 LS-Dyna 进行尺寸优化。有限元模型如图 18-1 所示，要求在碰撞时（见图 18-2）满足内能小于 450，支反力小于 75 的前提下最小化模型质量。设计变量为.bdf 文件中*SECTION_SHELL 关键字定义的模型 4 部分的厚度，壳单元的厚度可以在 0.5～2.0 之间变化，其初始厚度为 1.0。优化问题的类型为尺寸优化。

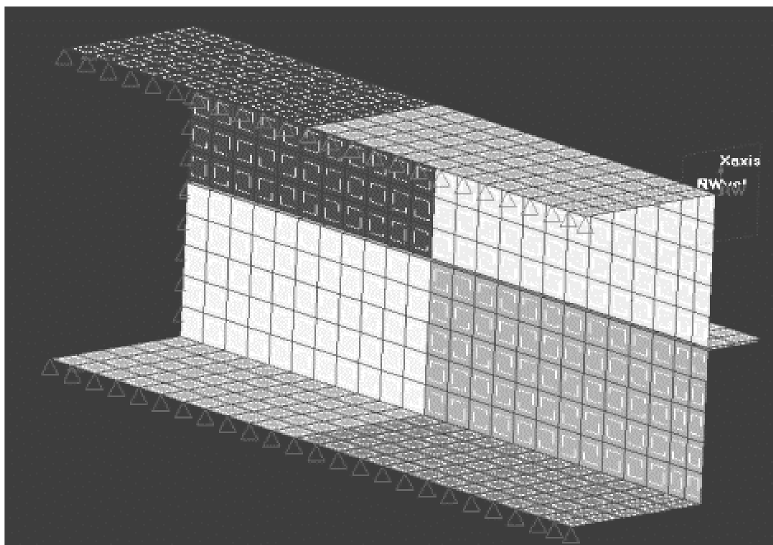


图 18-1　有限元模型

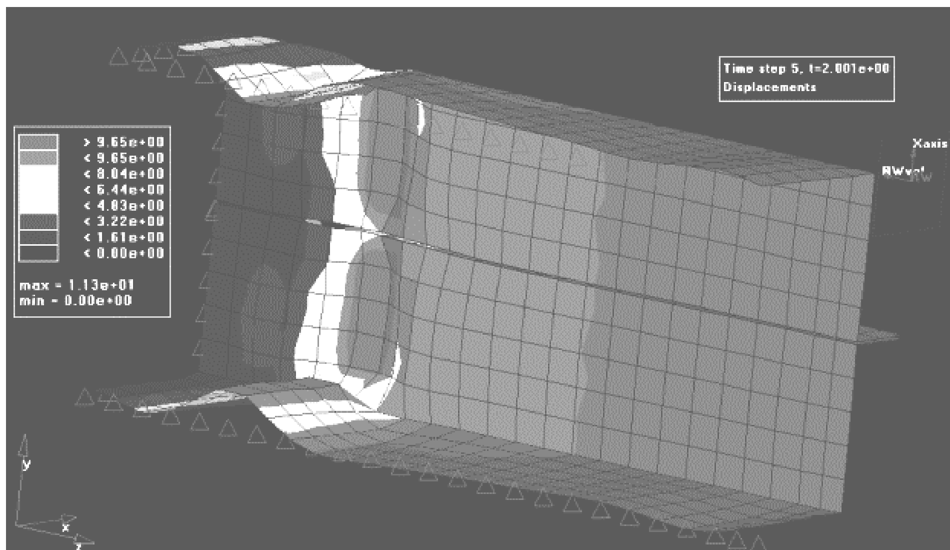


图 18-2　模型在时间单位 t=2.001 时的变形状态

STEP 01 在 HyperStudy 中建立基本输入模板

（1）启动 HyperStudy。

（2）在 Utilities 下拉菜单中选择 Editor。

（3）在弹出的窗口的 File 下选择 Open，然后选择 boxbeam.bdf 文件。

（4）在 Edit 功能下，通过 Find 功能搜索关键字*SECTION_SHELL。可以看到，在该 bdf 文件中，共有 4 处*SECTION_SHELL 关键字，并分别有属于自己的特定编号。每一关键字内部包含了壳单元厚度的信息。这里需要使用标准格式的 Templex 工具，将 4 处厚度信息定义为设计变量。

（5）高亮显示第一栏，如图 18-3 所示。

```
*SECTION_SHELL
$HMNAME PROPS       11
         1         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
$HMNAME PROPS       22
         2         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
$HMNAME PROPS       33
         3         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
$HMNAME PROPS       44
         4         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
```

图 18-3 数据选择

（6）在该栏上单击鼠标右键，并选择 Create Design Variable.

（7）在弹出的窗口中输入以下内容。

Name：	t1
Label：	Upper part
Description：	Upper part
Initial value：	1.0
Lower Bound：	0.5
Upper Bound：	2.0
Format：	%10.5f

（8）单击 OK 按钮。

步骤（6）～（8）完成了对第一个设计变量的定义。使用名为 t1 的设计变量置换了壳单元原有的厚度信息。在这一行以下的 3 个数据栏中的设计变量必须与第一栏中的设计变量相一致，因此还需要将设计变量 t1 赋予这一行后 3 栏的参数。

（9）高亮显示第二栏。

（10）在该栏上单击鼠标右键，并选择 Create Design Variable.

（11）在弹出窗口的 Define in 中选择 t1。

（12）步骤（9）～（11）完成了向第二栏赋予设计变量 t1 的工作。

（13）重复以上步骤，为第三栏和第四栏分别赋予设计变量 t1。第二个部件的厚度需要与第一个部件的厚度协调变化。因此，还需要将设计变量 t1 赋予第二个设计变量的 4 个厚度参数。

（14）重复步骤（5）～（11），为 Lower part 赋予设计变量 t2。定义完成的基本输入模板如图 18-4 所示。

```
*SECTION_SHELL
$HMNAME PROPS       11
         1         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
$HMNAME PROPS       22
         2         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
$HMNAME PROPS       33
         3         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
$HMNAME PROPS       44
         4         2       1.0          20.000000000.00000000          0
1.000000001.000000001.000000001.000000000.00000000
```

图 18-4　数据显示

（15）单击 Show/Generate Templex，则 HyperStudy 会生成 boxbeam.tpl 文件，其中包括设计变量 t1 和 t2 的信息，如图 18-5 所示。

```
boxbeam.tpl
{parameter(t1, "upper part", 1, 0.5, 2) 'upper part}
{parameter(t2, "lower part", 1, 0.5, 2) 'lower part}
```

图 18-5　tpl 文件

（16）保存模板文件。

（17）单击 Evaluate 图标，查看模板定义情况。

STEP 02 注册 LS-Dyna 为 HyperStudy 可识别的求解器

为了将 LS-Dyna 注册为 HyperStudy 可以识别的求解器，就需要在 HyperStudy 的 Preference 文件中完成相关参数的设置。

（1）进入 Tools 下拉菜单。

（2）选择 Register Solver Script，则用户界面中会弹出 Register Solver Script 窗口

（3）单击 Add。

（4）在 Label 处输入 Dyna。

（5）在 Variable 处输入 Dyna。

（6）选择 Script。

（7）单击 OK 按钮。

（8）此时，可以将此前设定的参数通过 Save as 功能，单独保存为一个 Preference 文件并供以后调用（例如，保存为名为 userprefs.mvw 的文件）。但不要覆盖 HyperWorks 安装路径下的<install_directory>/hw 文件。在 UNIX 平台上，Preference 文件也可以放在 home 目录下或当前的工作目录下。

（9）从 File 菜单中选择 Set Preference File，然后选择上一步中创建的 Preference 文件。HyperStudy 将读取安装目录下默认的 Preference File，同时还将读取指定的 Preference File。这可以保证所有的读取器和输入模板可用。

用户可以通过 Append 对当前的 Preference File 进行扩展，或者通过单击 Close 按钮离开求解器注册。此时，注册的求解器只能被当前的模型所辨识。

STEP 03 建立研究模型

（1）单击 Add Study。

（2）选择 New，用户界面中会弹出 Add Study 对话框。

（3）单击 OK 按钮。

（4）在窗口的右上方通过文件浏览器选择工作文件夹作为 Study directory。

（5）单击 Next 按钮，进入 Create models 窗口。

（6）单击 Add Model。

（7）单击 OK 按钮，列表中已添加一个新模型。

（8）在窗口的右上方选取 Template file。

（9）选择此前创建的 boxbeam.tpl 文件。

（10）单击 Open 按钮。

（11）单击 Next 按钮进入定义设计变量 Design Variables 对话框。

（12）检查设计变量上、下限的设置情况。

（13）单击 Next 按钮进入 Do nominal run 窗口。

（14）在 Solver input Files field 一栏，填入 boxbeam.key。这是此前由 HyperStudy 创建的，用于 DYNA 的基本输入文件。

（15）在下拉菜单中，选择 DYNA 作为目标求解器。

（16）DYNA 的输入文件为 boxbeam.key。

（17）将求解器控制参数填写为 i=$file.

STEP 04 进行基本求解

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮，将在用户选定的工作文件夹下创建 nom_run/m_1 文件夹，其中包括文件 glstat（输出应变能信息）、

spcforc（输出支反力信息）以及 d3hsp（输出结构质量信息）等各类求解结果信息。所有以上的结果文件都将被存储在目录 nom_run/m_1 中。

（2）单击 Next 按钮，进入 Create responses 面板。

STEP 05 定义响应

（1）单击 Add Response。

（2）在 label 中填入 Energy。

（3）单击 OK 按钮。

（4）重复以上步骤，分别建立名为 Force 和 Mass 的响应。

（5）单击 Energy。

（6）单击 Expr Builder，则 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口会出现在用户界面中。

（7）在 Vectors 一栏中单击 Add 按钮，则名为 Vector 1 的结果向量被添加到列表中。该向量的内容还需要在下面的步骤中进行定义。

（8）在 Vector resource file 中单击浏览器按钮，选择 glstat 文件。

（9）将 Vector 1 定义为模型的内能，需要在 Vectors 面板的右下方的下拉菜单中设置以下内容。

Type：	Energy
Request：	Internal Energy
Component：	Energy

（10）单击 Functions，Functions 列表出现在用户界面中。

（11）选择 max。

（12）单击 OK 按钮。

max() 当前被选中，并显示在 Expression 一栏中。

Vector 1 仍然被高亮显示。

（13）单击 Apply 按钮，在 Expression 一栏中调用 max()表达式。Expression 一栏应该显示的内容为 max(v_1)。该响应将作为优化问题的约束之一。

（14）选中 Evaluate response expression 复选框，则表达式 max(v_1) 应该被数字 489.611 所取代。

（15）单击 OK 按钮。

（16）单击 Force。

（17）再次单击 Expr Builder。

STEP 06 定义第二个响应向量

（1）在 Vectors 面板下，单击 Add 按钮，建立第二个响应向量 Vector 2。

（2）在 Vector resource file 中需要指定包含支反力信息的文件。

（3）在 nom_run/m_1 目录中选择 spcforce 文件。

（4）按以下内容定义 Vector 2 的相关参数，以获取 Z 方向支反力响应。

Type：	Force
Request：	Resultants
Component：	Z

（5）单击 Functions。

（6）选择 max。

（7）单击 OK 按钮。

注意，Vector 2 依然处于高亮状态。

（8）单击 Apply 按钮，Expression 一栏应该显示 max(v_2)。该响应将作为优化问题的另一个约束。

（9）选中 Evaluate response expression，则表达式 max(v_2)将被数字 77.77 所取代。

（10）单击 OK 按钮。

（11）单击 Mass。

（12）第三次单击 Expr Builder。

STEP 07 为质量建立第三个响应向量

（1）在 Vectors tab 面板下单击 Add 按钮，则在列表中添加了向量 Vector 3。

（2）选择 Vector resource file，选择包含模型质量信息的 d3hsp 文件。

（3）按以下内容填入 Vector 3 相关参数，建立模型质量的响应。

Type：	LS-Dyna Mass Properties
Request：	Total
Component：	Mass

（4）单击 Apply 按钮。

（5）选中 Evaluate response expression，则表达式 v_3[0]将被数字 0.44643 所取代。

（6）单击 OK 按钮。

到此为止，完成了基本的模型定义。以该模型为基础可以进行各类研究工作（DOE、优化和随机性研究）。

STEP 08 优化设计

（1）选中 Create optimization。

（2）单击 Add Optimization。

（3）在用户界面右上方的窗口中，选择优化引擎 Optimization Engine：ARSM-Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮进入创建设计变量 e Design Variables 对话框。该步骤允许用户查看此前定义的设计变量。

（5）单击 Next 按钮，进入定义约束 Define constraints 对话框。
（6）单击 Add constraint。
（7）单击 OK 按钮。
（8）在 Apply Constraint On 中，选择响应 Energy。
（9）在 Bound Type >=（大于等于）中，设置其下限为 450。
（10）再次单击 Add constraint。
（11）单击 OK 按钮。
（12）在 Apply Constraint On 中，选择响应 Force。
（13）在 Bound Type<=（小于等于）中，设置其上限为 75。
（14）单击 Next 按钮，进入定义目标函数 Define objective 对话框。
（15）单击 Add objective。
（16）单击 OK 按钮。
（17）在 Apply On 中，选择 Mass。
（18）在 Objective 中，选择 Minimize。其他的优化参数不需要改变。
（19）单击 Click Launch optimization，开始优化迭代。
（20）优化迭代结束后，单击 Next 按钮进入后处理面板。

STEP 09 查看优化历程

（1）使用 Optimization results plot file 中的浏览器选择优化迭代生成的 opt_1.hgres 文件。
（2）单击 Open 按钮，读取该文件。
（3）则在该面板下，可以查看 Obj & Constr.，DV 以及 Responses 等各类信息。
（4）选中复选框，选取自己感兴趣的响应的优化历程。

18.2 实例：集成 ANSYS 的形状优化

本实例将演示如何从 HyperMesh 中直接启动 HyperStudy，然后调用 ANSYS 作为求解器进行形状优化。HyperMorph 被用来设定形状优化的预变形参数。

在本实例中，将进行以下工作：

✓ 从 HyperMesh 中启动 HyperStudy。
✓ 建立一个 Study。
✓ 提交形状优化进行计算。

上述文件路径包含以下文件：

✓ plate.cdb 原有的 ANSYS 输入文件。
✓ ansys.bat 调用 ANSYS 的脚本示例文件。

本实例的目标是最小化带孔圆板（见图 18-6）的最大应力，方法是将圆孔变形为某种椭圆，因此设计变量为孔的两个轴向半径。

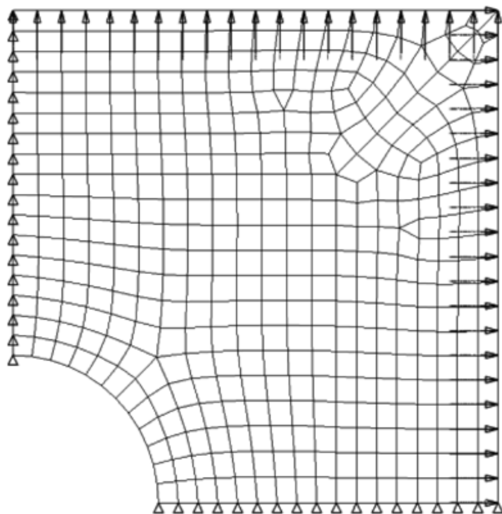


图 18-6　带圆孔板的 1/4 对称模型

STEP 01 在 HyperMesh 中建立模型

（1）启动 HyperMesh。

（2）从 Preferences 下拉菜单中，单击 User Profile。

（3）选择 ANSYS。

（4）单击 OK 按钮。

（5）单击 File 菜单栏按钮。

（6）选择 import。

（7）确保 Import type 是 solve deck。

（8）确保 File type 是 ANSYS。

（9）打开文件 plate.cdb。

（10）这将导入有限元模型。

（11）单击 Import。

STEP 02 在 HyperMorph 中执行形状优化预变形方案

（1）进入 Tool 页面。

（2）单击 HyperMorph，进入 HyperMorph 子面板。

（3）单击 domains，进入创建 domains 的子面板，用于形状优化。在实例中，使用自动创建的 domains 就可以了。

（4）确保标签选中的是 Create。

（5）切换 global domains 为 auto functions。

（6）单击 generate，生成 domains 和 handles，用于操控网格的形状，最后生成用于形状

优化的预变形方案，如图 18-7 所示。

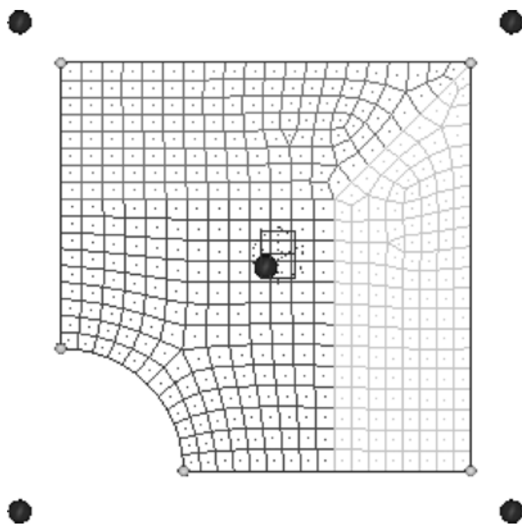


图 18-7　创建变形区域（domain）

（7）单击 return 按钮。

（8）单击 morph，进入 morph 面板，调整网格的形状。该步骤的目标是创建 3 个形状变量：椭圆的两个轴半径以及孔的半径。

（9）单击 set biasing 标签。

（10）选择 1/4 圆上的两个角点上的黄色 handles。

（11）设置 bias 的值为 2.000。

（12）单击 update。

（13）单击 alter dimensions 标签，这样半径可以被设置为形状参数。

（14）选择上面的类型为 radius。

（15）选择下面的类型为 hold center。

（16）选择孔的红色边界线。

（17）输入 radius 的值为 20.0000。

（18）单击 morph，生成第一个形状。

（19）选择 save shape 子标签。

（20）在 name =中输入 sh1。

（21）单击 Save 按钮。

（22）单击 undo 恢复当前的原始形状，以便为下一步变形做准备。

（23）单击标签 move handles。

（24）选择最上面的类型为 translate，下面的类型为 along xyz。

选择孔中位置较低的黄色 handle。在 xval = 中输入 10.0000。

（25）单击 morph，产生第二个形状。

（26）选择标签 save shape，在 name =中输入 sh2。

（27）单击 Save 按钮。

（28）单击 undo 恢复当前的原始形状，以便为下一步变形做准备。

（29）单击标签 move handles。

（30）单击重置以前选中的 handles。选择孔上的位置较高的黄色 handle。在 xval =中输入 0.000，在 yval = 中输入 10.0000。

（31）单击 morph，产生第三个形状。

（32）单击标签 save as shape。

（33）在 shape = 中输入 sh3。

（34）单击 Save 按钮。

（35）单击 undo 恢复当前的原始形状。

（36）单击 return 按钮两次。

STEP 03 开始建立 study

（1）进入 Applications 下拉菜单。

（2）选择 HyperStudy，进入 HyperStudy 界面。

（3）注册求解器 ANSYS。为了能调用 ANSYS 做求解器，必须在 HyperStudy 中注册 ANSYS。

（4）进入 Tools 下拉菜单。

（5）选择 Register Solver Script，弹出注册求解器窗口。

（6）单击 Add 按钮，输入标签：ANSYS，输入变量：ANSYS。

（7）查找调用 ANSYS 的脚本。脚本 ansys.bat 是一个调用 Windows 下 ANSYS 的样本脚本，可复制该文件到任何路径下去使用该脚本。

（8）单击 OK 按钮。现在可以保存该自定义的配置文件，使用 Save as 功能，并设定保存的配置文件的名称，如 userprefs.mvw。需要注意的是，不要覆盖原来软件自带的配置文件，该文件位于<install_directory>/hw 文件夹下。在 UNIX 系统，该配置文件位于启动 HyperStudy 的工作路径或 home 文件夹下。

（9）从 File 菜单中，选择 Set Preference File 并选择刚才保存的配置文件。HyperStudy 读入安装路径下默认的配置文件，然后再读入用户指定的配置文件，这样可保证所有的输入/输出模板都可以使用。也可以单击 Close 按钮退出注册求解器面板，不过，这样求解器便仅仅对当前的 study 有用，下一次打开 HyperStudy 该求解器将不可用。

STEP 04 建立一个 study

（1）单击 Add study。

（2）选择 New，弹出新建 Study 的对话框。

（3）单击 OK 按钮，选择一个工作路径为 Study 的路径。

（4）单击 Next 按钮。

（5）单击 Add model，选择 Model type 为 HyperMesh。

（6）单击 OK 按钮，建立一个新模型。

（7）单击 Next 按钮以便继续定义设计变量。

（8）单击 Add Model Parameter，将进入模型组件树视图。

（9）展开 Shape，选择 sh1，确保上、下限分别为-1 和 1，单击 Add 按钮。

（10）对 sh2 和 sh3，重复步骤（12）～（14）。

（11）单击 OK 按钮。

（12）回到设计变量对话框，创建了 3 个设计变量。检查初始值和上下限的设置。

（13）单击 Next 按钮，进入 Do nominal run 窗口。

（14）在求解器输入文件一栏，输入 plate.cdb。

（15）从下拉菜单中选择 ANSYS 作为求解器。ANSYS 求解器的输入文件为 plate.cdb。

（16）在 $file 后输入 plate.outplate 作为求解器的输入参数。它们是传递给 ANSYS 脚本的变量。

STEP 05 执行 base run

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮。当 ANSYS 执行完毕时，会弹出一个窗口。

（2）单击 OK 按钮。

（3）在工作路径下，一个名叫 nom_run/m_1 的文件夹被创建。在这些文件中，有一个 plate.rst 文件，包含了位移和应力的结果。

（4）单击 Next 按钮，创建响应的面板呈现。

STEP 06 创建响应

（1）单击 Next 按钮。

（2）单击 Add response。

（3）单击 OK 按钮。

（4）单击 Response_1。

（5）单击 Response Expr Builder，弹出 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口。

（6）在向量标签页 Vectors tab 中，单击 Add 按钮，增加一个名为 Vector1 的向量。该向量需要被定义，添加数据。

（7）选择包含有限元结果数据的文件，定义该向量。单击浏览按钮，并选择文件 plate.rst。

定义 Vector 1 为 von Mises 单元应力，设置如下：

- ✓ Type：Step 0
- ✓ Request：Element data
- ✓ Component：Stresses von Mises SEQ

（8）单击 Functions，这样函数列表便呈现了。

（9）选择 max。

（10）单击 OK 按钮，最大值函数 max()被选中，并被展现在 Response Expression 中。

Vector 1 依然被高亮显示。

（11）单击 Apply 按钮，使用该向量作为 max()的传递参数。这样 Response Expression field 应该展现表达式 max(v_1)，该值是优化目标。

（12）选中 Evaluate expression 复选框，表达式 max(v_1)的值应该显示为 2.08422。

（13）单击 OK 按钮。

至此完成了 Study 的创建。接下来可以进行各种研究，如 DOE、优化以及随机分析。

STEP 07 运行优化

（1）在导航树中单击优化中的空白选择框。

（2）单击 Add optimization，在右上角的窗口中选择 ASRM-Adaptive Response Surface Method。

（3）单击 Next 按钮，继续进行设计变量定义。这样便可以查看以前所定义的设计变量。

（4）单击 Next 按钮进入约束定义对话框，目前不需要定义约束。

（5）单击 Next 按钮进入定义目标函数对话框。

（6）单击 Add Objective。

（7）单击 OK 按钮。

（8）选择 Response_1 响应作为目标。

（9）选择 Minimize 作为优化方向。不需要改变其他的优化参数。

（10）单击 Launch optimization。

（11）在优化结束后，单击 Next 按钮进入后处理模块。

STEP 08 查看优化的迭代历程

（1）opt_1.hgres 文件默认被加载，如果没有，使用文件浏览器选择该文件作为要查看的数据源。

（2）单击 Open 按钮加载该文件。

（3）在每一个表中，目标、约束变量以及响应都被呈现。

（4）单击复选框以便显示合适的迭代过程曲线。

18.3 实例：集成 Abaqus 的形状优化

本实例将演示如何从 HyperMesh 中直接启动 HyperStudy，调用 Abaqus 求解器进行形状优化。HyperMorph 被用来设定形状优化的预变形参数。本实例也将展示如何解决 HyperMesh 和 HyperStudy 在 Windows 系统运行而求解器在 UNIX 系统运行的问题。

在本实例中，将进行以下工作：

✓ 利用 HyperMorph 生成一个形状变量。

✓ 从 HyperMesh 中启动 HyperStudy。
✓ 利用 HyperStudy 设置形状预变形参数。
✓ 建立一个 Study。
✓ 编辑一个用于在 UNIX 上运行 Abaqus 的脚本并注册该脚本。
✓ 提交形状优化。

上述文件路径包括以下文件：

✓ link.hm 原有的 HyperMesh 文件。
✓ abaqus.bat 脚本示例文件。
✓ run_abaqus.bat 用于在 UNIX 上运行 Abaqus 的脚本示例文件。

优化目标是模型（见图 18-8）质量最轻，给定应力约束为 200MPa。

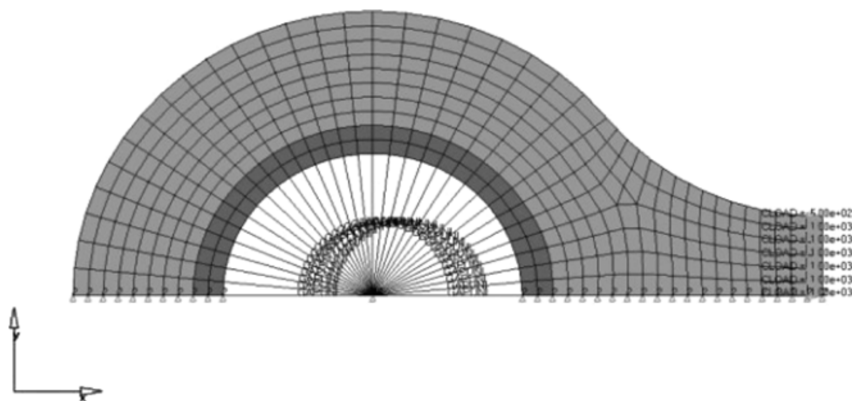


图 18-8　有限元模型

STEP 01 在 HyperMesh 中导入模型

（1）启动 HyperMesh。
（2）在 User Profiles 对话框中选择 Abaqus 并设置切换至 Standard2D。
（3）单击 OK 按钮。
也可以通过单击 Preferences 下拉菜单中的 User Profile 选项进入 User Profiles 对话框。
（4）单击 Files 面板工具栏按钮。
（5）选择 hm file 子面板。
（6）单击 Retrieve 并使用文件浏览器打开 link.hm 文件。
（7）单击 return 按钮。

STEP 02 在 HyperMorph 中执行形状优化预变形方案并启动 Study

（1）在 HyperMesh 中进入 Tool 面板。
（2）单击 HyperMorph。
（3）单击 domains。

（4）选择 2D domains。

（5）选择 all elements。

（6）单击 create 按钮，生成了 domains 和 handles，用于操控网格的形状，最后生成用于形状优化的预变形方案。

（7）单击 return 按钮。

（8）单击 morph，进入 morph 面板，调整网格的形状。该步骤的目标是创建一个设计变量：月牙板的轮廓边界。

（9）将 interaction 切换至 translate。

（10）将 y val 设成-0.5，选择月牙板右上角的黄色 handle。

（11）单击 morph，选择 save as shape 选项，在 shape=后输入 sh1。

（12）单击 Save 按钮。

（13）单击 undo 返回原始网格。

（14）单击 return 按钮直至回到 Tools 面板。

（15）进入 Applications 下拉菜单。

（16）选择 HyperStudy，进入 HyperStudy 界面。

STEP 03 当文件目录和求解器均在 UNIX 系统上时，在 Windows 系统上运行 HyperStudy

Windows 系统计算机可以通过网络映射访问 UNIX 系统上的文件。

Abaqus.bat 文件是一个示例文件，用于通过运行在 Windows 上的 HyperStudy 执行在 UNIX 上的求解器。该文件利用 rsh 命令登录 UNIX 机器，并通过求解器运行由 HyperStudy 创建的文件。为了使用该示例脚本文件，需要进行以下操作：

（1）通过文本编辑器打开 abaqus.bat 文件。

（2）相应地修改 UNIX_machine 和 user 参数。

（3）相应地修改 run_abaqus.bat 的路径。run_abaqus.bat 是用于执行 Abaqus 的 UNIX 批文件。

（4）将 run_abaqus.bat 复制到 UNIX 平台的工作目录下。

（5）从命令提示信息中，使用 run_abaqus.bat 删除所有行中^M 字符后的内容。

（6）打开 run_abaqus.bat 脚本文件并相应地改变 Abaqus 命令行。

（7）确保在命令提示栏输入 chmod 755 run_abaqus.dat 时，run_abaqus.bat 可以运行。

（8）为了能执行 rsh 命令，需要在扩展名.rhosts 文件中加入计算机用户名和密码。可以在 UNIX 系统上使用 vi 或其他编辑器实现。扩展名.rhosts 文件必须有用户赋予的读/写权限。

STEP 04 注册 ABAQUS 作为求解器

为了调用 Abaqus 做求解器，必须在 HyperStudy 中注册 Abaqus。

（1）进入 Tools 下拉菜单。

（2）选择 Register Solver Script，弹出注册求解器窗口。

（3）单击 Add。

（4）输入标签：Abaqus。

（5）输入变量：Aabqus。

（6）查找脚本文件。脚本文件 abaqus.bat 是一个 Windows 示例脚本，用于登录需要的 UNIX 机器并执行 run_abaqus.bat UNIX 脚本以运行 Abaqus。可复制 abaqus.bat 文件到 C 盘的任意目录下使用该脚本。

（7）单击 OK 按钮。

（8）现在可以保存该用户自定义偏好，使用 Save as 功能，并制定保存的偏好的名称，如 userprefs.mvw。需要注意的是，不要覆盖原来软件自带的配置文件，该文件位于<install_directory>/hw 文件夹下。在 UNIX 系统，该配置文件位于启动 HyperStudy 的工作路径或 home 文件夹下。

（9）从 File 菜单下选择 Set Preference File 并选择刚才保存的配置文件。HyperStudy 会读入安装路径下的默认的配置文件，然后再读入用户指定的配置文件，这样就可以保证所有的输入/输出模板都可以使用。可以单击 Append 按钮增加当前配置文件，也可以单击 Close 按钮退出注册求解器面板，不过这样求解器便仅仅对当前的 study 有用。

STEP 05 建立一个 Study

（1）单击 Add study。

（2）选择 New，弹出 Add study 对话框。

（3）单击 OK 按钮，使用窗口右上角的文件浏览器选择 UNIX 平台的工作目录作为 Study directory。UNIX 工作目录必须映射到 Windows 计算机的某个盘符下，可以通过使用 Tools 和 Map Network Drive 实现。

（4）单击 Next 按钮进入 Create models 窗口。

（5）单击 Add model。

（6）选择 Model type：HyperMesh。

（7）单击 OK 按钮，一个新模型被添加到列表中。

（8）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框以添加设计变量。

（9）单击 Add Model Parameter，将显示进入模型组件树视图。

（10）展开 Shape。

（11）选择 sh1，确保上、下限分别为 0.0 和 1.0。

（12）单击 Add。

（13）单击 OK 按钮，将回到 Design Variables 对话框。

（14）检查 initial value、lower 和 upper bounds 项的设置。

（15）单击 Next 按钮进入 Do nominal run 窗口。

（16）在 Solver input Files 一栏输入 link.inp。这是 HyperStudy 为求解器创建的输入文件名。

（17）从下拉菜单中选择 Abaqus 作为求解器。

（18）Abaqus 的输入文件为 link.inp。

（19）在 Solver input 栏用 link 替代$file。

为了在 Windows 与 UNIX 间建立链接，必须替换$file。

STEP 06 执行 base run

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮，将在 study 工作目录下创建一个 now_run/m_1 文件夹。在这些文件中，有一个 link.fil 文件，包含了位移和应力结果。

（2）单击 Next 按钮，将呈现 Create responses 面板。

STEP 07 创建响应

（1）单击 Add response。

（2）单击 OK 按钮。

（3）单击 Response_1。

（4）单击 Response Expr Builder，HyperStudy-Response Expression Builder 面板将呈现。

（5）在 Vectors 标签上单击 Add，增加一个名为 Vector 1 的向量。该向量需要被定义，添加数据。选择 Vector resource file 添加该结果数据向量。

（6）单击 Vector resource file 下的浏览按钮并选择 link.dat 文件。从下拉菜单的 Vectors 标签中定义 Vector 1 作为模型的质量，选择以下选项。

Type：Mass

Request：MASS

Component：Value

（7）单击 Apply 以便使用 Expression 栏中的向量。现在 Expression 栏将显示表达式 v_1[0]，该值为质量响应。

（8）单击 Evaluated，表达式 v_1[0]将变为 0.000132615。

（9）单击 OK 按钮。

（10）重复该步骤创建应力响应。

（11）单击 Vector resource file 下的浏览按钮并选择 link.fil 文件。

（12）从下拉菜单的 Vectors 标签中定义 Vector 2 作为模型的质量，选择以下选项。

Type：Step 0

Request：Element data

Component：SINV-Mises stress

（13）在 Response expression 栏编辑表达式 max(v_1)。

（14）单击 Evaluated，表达式 max(v_1)将变成 138.02。

（15）单击 Finish，完成了 Study 的建立，接下来可以进行各种研究（如 DOE、优化以及随机分析）。

STEP 08 运行优化

（1）在导航树中单击优化中的空白选择框。

（2）单击 Add optimization。

（3）在窗口的右上角，选择 Optimization Engine：ARSM-Adaptive Response Surface Method。

（4）单击 Next 按钮进入 Design Variables 对话框，可以查看之前定义的设计变量。

（5）单击 Next 按钮进入 Define constraints 对话框，可以查看之前定义的约束变量。

（6）单击 Add constraint。

（7）单击 OK 按钮。

（8）从右上角的下拉列表中选择 Response_2。

（9）设置上限为 200.0，上限类型为<=（小于或者等于）。

（10）单击 Next 按钮进入 Define objective 对话框。

（11）单击 Add objective。

（12）单击 OK 按钮。

（13）从 Apply on 下拉菜单中选择 Response_1。

（14）从 Objective 下拉菜单中选择 Minimize。

（15）单击 Launch optimization。一个信息窗口会提醒将运行的优化方式（交互模式或者批处理模式）。该模式可通过以下方法修改：在 HyperStudy 菜单的 Tools 下拉菜单中，选择 Job management，接着选择 Optimization Study。

（16）在优化完成后，单击 Next 按钮进入后处理模块。

STEP 09 查看优化迭代历程

（1）\optimization\opt_1\opt_1.hgres 文件作为优化结果文件被导入。在每一个表中，目标、约束变量以及响应都被呈现。

（2）单击某项以查看对应的迭代历程。

18.4 实例：集成 Madymo 的 DOE 分析

本实例将演示如何用 Madymo 与 HyperStudy 集成进行乘员碰撞安全 DOE 分析。

在本实例中，将学习到以下几个方面的知识：

✓ 用 HyperStudy Editor 创建设计变量。

✓ 建立分析模型。

✓ DOE 分析计算。

本实例中的设计变量是穿透力曲线的放大系数、靠椅加载力曲线的放大系数和头枕的位置，目的是研究假人-座椅接触刚度，靠椅加载力和假人头部与头枕距离的改变对假人颈部伤害的影响有多大。

STEP 01 用 HyperStudy Editor 创建设计变量

（1）打开 HyperStudy。

（2）从菜单中单击 Utilities。

（3）选择 HyperStudy Editor 打开编辑器，如图 18-9

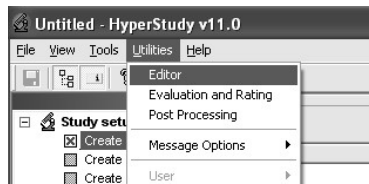


图 18-9 打开编辑器

所示。

（4）从编辑器的菜单中单击 File。

（5）选择 Open 打开 Madymo 输入文件 a_hffoam_TEST.xml。

（6）选择 Find 搜索 FUNC_USAGE，如图 18-10 所示

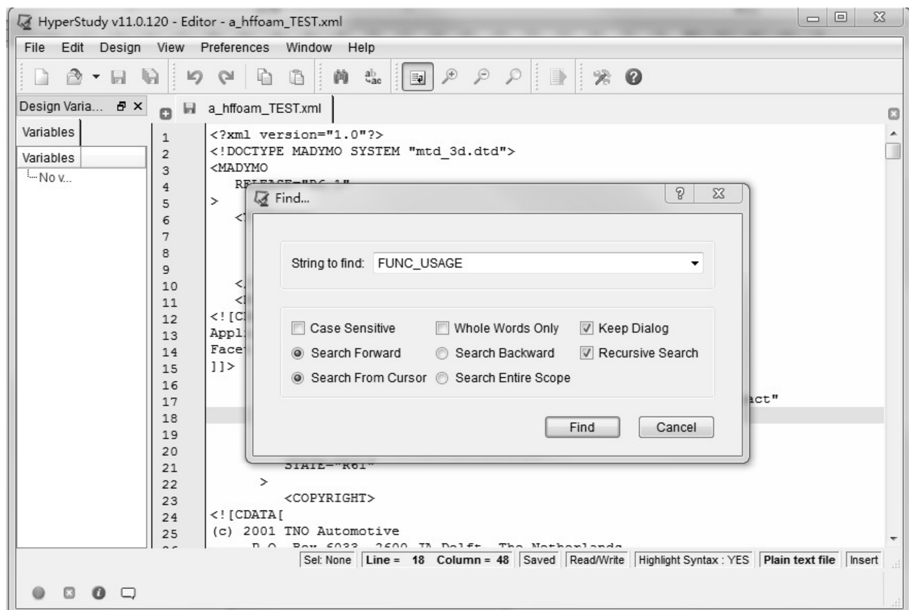


图 18-10　搜索界面

（7）选择 Y_SCALE 后面的 1，数字 1 高亮显示，如图 18-11。

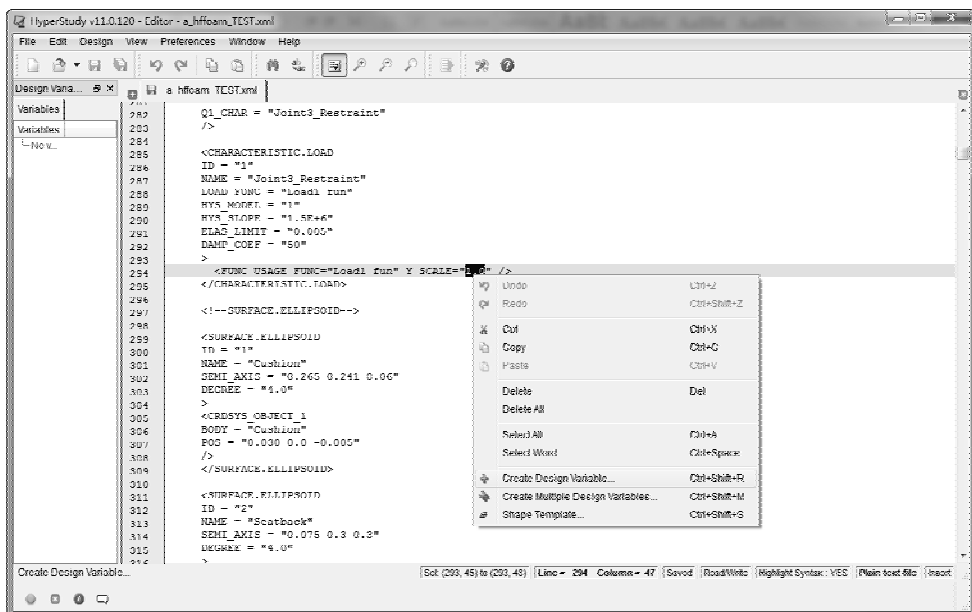


图 18-11　选择响应数值

（8）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Design Variable。

（9）在 Design Variable Properties 菜单的 Name 一栏中输入 Recliner。

（10）在 Initial Value 文本框中输入 1.0，在 Lower Bound 文本框中输入 0.7，在 Upper Bound 文本框中输入 1.3，在 Format 文本框中输入%3.1f，单击 OK 按钮，如图 18-12 所示。

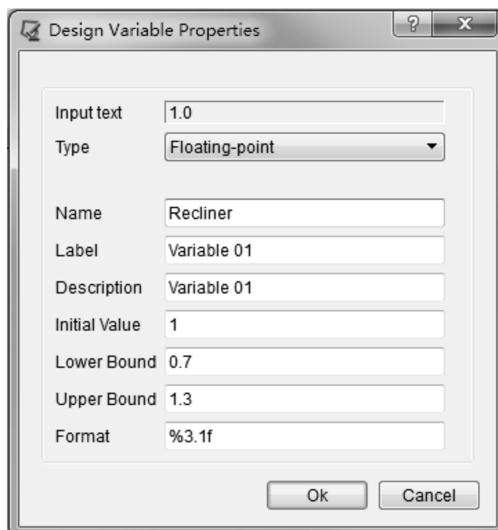


图 18-12 设计变量属性

（11）用 Find 搜索 BODY=Hrest。

（12）选择 POS=0.02 0.0 0.22 的 0.02。

（13）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Design Variable。

（14）在 Design Variable Properties 菜单的 Name 一栏中输入 Fact1Level。

（15）在 Initial Value 文本框中输入 0.02，在 Lower Bound 文本框中输入 0.00，在 Upper Bound 文本框中输入 0.04，在 Format 文本框中输入%3.1f，单击 OK 按钮。

（16）用 Find 搜索 FUNC_USAGE。

（17）选择 Y_SCALE 后面的放大系数 1.0。

（18）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Design Variable。

（19）在 Design Variable Properties 菜单的 Name 一栏中输入 contactHR。

（20）在 Initial Value 文本框中输入 1.0，在 Lower Bound 文本框中输入 0.8，在 Upper Bound 文本框中输入 1.2，在 Format 文本框中输入%3.1f，单击 OK 按钮。

（21）用 Find 搜索 FUNC_USAGE。

（22）选择 Y_SCALE 后面的放大系数 1.0。

（23）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Design Variable，在 Define in 下选择 contactHR。这将应用同样的设计变量，如图 18-13。

（24）用 Find 搜索 FUNC_USAGE。

（25）选择 Y_SCALE 后面的放大系数 1.0。

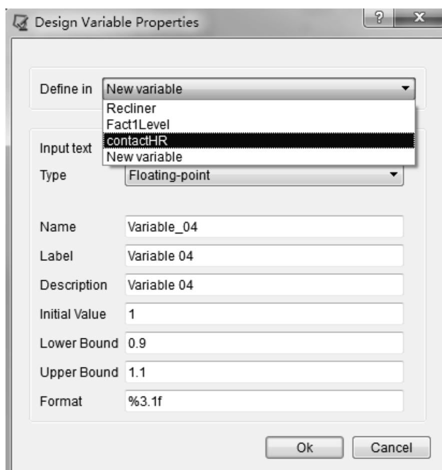


图 18-13　变量创建

（26）单击鼠标右键在弹出的快捷菜单中选择 Create Design Variable，在 Define in 下选择 contactHR。这将应用同样的设计变量。

（27）单击 Show/Generate Templex 按钮 。

（28）Tpl 文件生成，保存文件为 hffoam_TEST.tpl，如图 18-14 所示。

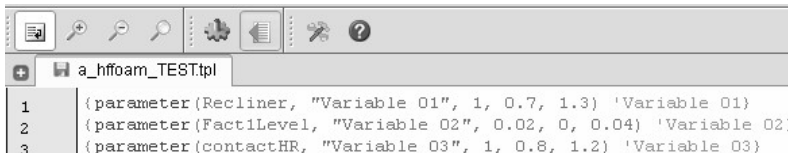


图 18-14　tpl 文件编辑

STEP 02 建立分析模型

（1）在 HyperStudy 窗口，单击 Add Study。

（2）单击 New。

（3）在 HyperStudy-Add Study 窗口，输入一个模型名字或选择默认的名字，单击 OK 按钮。

（4）在 Study Directory 下选择工作目录。

（5）单击 Next 按钮。

（6）单击 Add Models。

（7）在 HyperStudy-Add Model 窗口输入一个模型名字或选择默认名字。

（8）确认 Model Type 为 Template，单击 OK 按钮，如图 18-15 所示。

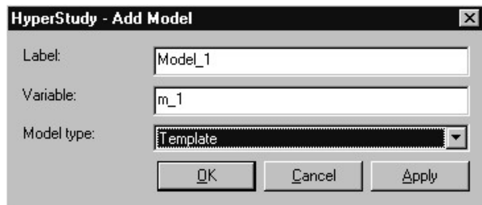


图 18-15　选择模型类型

（9）在 Template file 下选择保存的文件 a_hffoam_TEST.tpl。

（10）单击 Next 按钮。

（11）Design variables 页面显示在文件 a_hffoam_TEST.tpl 中定义的设计变量。

（12）单击 Next 按钮。

STEP 03 提交计算

（1）在菜单中单击 Tools。

（2）选择 Register Solver Script，设置 Madymo 61 脚本文件 Madymo61.bat。

（3）在 Register Solver Script 窗口中选择 Add。

（4）在 HyperStudy-Register Script 窗口的 Label 文本框中输入 madymo，在 Variable 文本框中输入 mdym，单击 Script 选择 Madymo61.bat 文件，如图 18-16 所示。

（5）单击 Open 按钮，然后单击 OK 按钮。

（6）在 Register Solver Script 窗口下选择 Close。

注意：如果没有选择 Save as 和 Append，设置脚本文件仅仅应用这一次，当 HyperStudy 重启后，又要重新设置。



图 18-16 注册窗口

（7）在 Solver Input file 下输入 a_hffoam_TEST.xml。

（8）在 Solver execution script 栏的下拉菜单中选择设置的脚本。

（9）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，或者直接单击 Write/Execute 按钮。

（10）当 Madymo 作业计算完成，会出现如下信息：

End executing model(s) for approach (Setup (nom_1))

在 Study 的工作目录下会生成一个名 nom_run/m_1 的文件夹，结果文件就保存在这个目录下。

（11）单击 Next 按钮，create responses 面板便显示出来。

STEP 04 创建响应

（1）单击 Add response。

（2）在 HyperStudy-Add Response 窗口的 Label 栏输入响应的名字 NTF。

（3）单击 OK 按钮。

（4）选择 NTF。

（5）单击 Expr Builder，弹出 HyperStudy - Response Expression Builder 窗口。

（6）在 Vectors 页，单击 Add 按钮，创建变量名为 v_1 的结果向量 Vector 1，通过右键单击 Vector 1 可以编辑 Vector 1 的名字，接下来定义这个向量。

（7）单击 Vector resource file 栏下的浏览文件按钮，选择 a_hffoam_TEST.injury 文件。

（8）在 Type 下选择 MADYMO Results。

（9）在 Request 下，选择/3/2047（/Hybrid_III_50th/NeckUp_Fx_lce）LOAD_CELL Force

(N)　FILTER=CFC1000。

（10）Component 栏为空。

（11）在 Vectors 页单击 Add 添加另一个向量。此时 v_2 被创建。

（12）单击 Vector resource file 栏下的浏览文件按钮，选择 a_hffoam_TEST.injury 文件。

（13）在 Type 下选择 MADYMO Results。

（14）在 Request 下，选择/3/2049（/Hybrid_III_50th/NeckUp_Fz_lce）LOAD_CELL Force (N)　FILTER=CFC1000。

（15）Component 栏为空。

（16）在 Vectors 页单击 Add 添加另一个向量。此时 v_3 被创建。

（17）单击 Vector resource file 栏下的浏览文件按钮，选择 a_hffoam_TEST.injury 文件。

（18）在 Type 下选择 MADYMO Results。

（19）在 Request 下，选择/3/2052（/Hybrid_III_50th/NeckUp_My_lce）LOAD_CELL Torque (Nm) FILTER=CFC600。

（20）Component 栏为空。

（21）在 HyperStudy-Response Expression Builder 窗口单击 Function。

（22）在 Functions 窗口选择函数 nij，然后单击 OK 按钮。

（23）单击 Apply 将 3 个结果向量应用到 nij 表达式中，如图 18-17 所示。

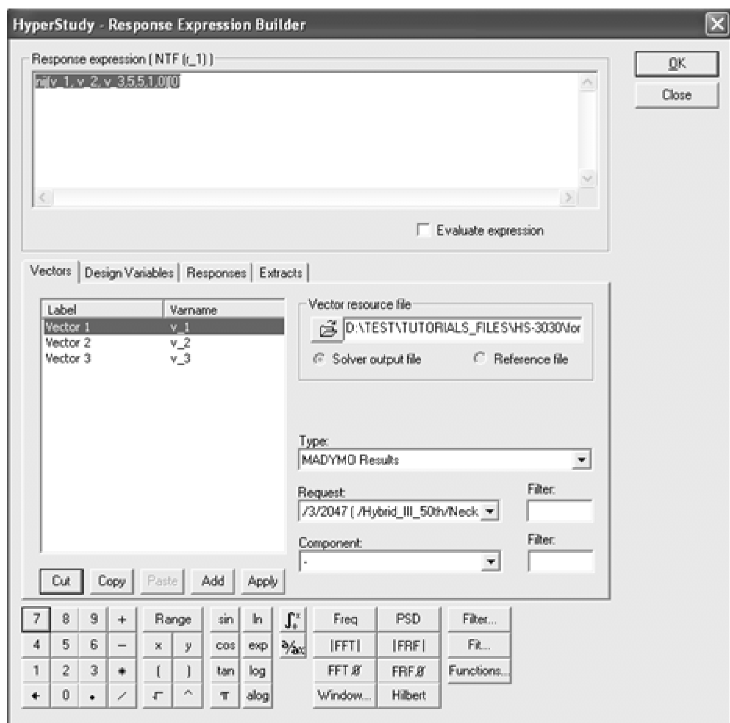


图 18-17　响应编辑窗口

（24）在 Response expression 栏下，编辑表达式如下 nij(v_1,v_2,v_3,5,5,1,0)[0]。

（25）选中 Evaluate response expression，表达式将改变为值 0.022117。

（26）单击 OK 按钮。
（27）单击 Add response，添加第二个颈部伤害评价标准，NTE。
（28）在 Response expression 栏下，编辑表达式为 nij(v_1,v_2,v_3,5,5,1,0)[1]。
（29）选中 Evaluate response expression，表达式将改变为值 0.029185。
（30）单击 Add response，添加第三个颈部伤害评价标准，NCF。
（31）在 Response expression 栏下，编辑表达式为 nij(v_1,v_2,v_3,5,5,1,0)[2]。
（32）选中 Evaluate response expression，表达式将改变为值 0.015077。
（33）单击 Add response，添加第四个颈部伤害评价标准，NCE。
（34）在 Response expression 栏下，编辑表达式为 nij(v_1,v_2,v_3,5,5,1,0)[3]。
（35）选中 Evaluate response expression，表达式将改变为值 0.010352。
模型建立完成，接下来可以做 DOE 分析、优化和随机性研究。

STEP 05 DOE 分析计算

（1）在结构树里单击 Create DOE study。
（2）单击 Add DOE Study。
（3）单击 OK 按钮。
（4）在 Controlled factors 下的 DOE Class 中选择 Full Factorial。
（5）让 Uncontrolled factors 的 DOE Class 保持默认的 None。
（6）单击 Next 按钮。
（7）选择设计变量 Fact1Level，在 No. of Levels 一栏，将它的水平数从 2 增加到 3。
（8）重复此过程，将 ReclinerandcontactHR 的水平数依次增加到 3。
（9）单击 Next 按钮，转到 Interactions 目录。
（10）保持默认的全析因设计下，所有交互性被选择。
（11）单击 Next 按钮。这一页显示 DOE 分析 27 次计算的各项水平列表。
（12）单击 Next 按钮跳过不需定义的 Uncontrolled variables。
（13）单击后直接转入 DOE responses 目录。
（14）检查响应。
（15）单击 Next 按钮进入提交运算页面。
（16）单击 Write/Execute 按钮。
（17）单击弹出的问题 Yes，程序将进行 27 次模型计算。
（18）单击 Next 按钮进入 Extract responses 页面。
（19）单击>> Extract >>，提出响应结果。
（20）在提出响应结果后，单击 Next 按钮进入 Post-processing 窗口。

STEP 06 DOE 分析的后处理结果

（1）在 Main Effect 页下，选中 Curve legend。
（2）仅仅选中 NTF，观察 NTF 的影响，如图 18-18 所示。

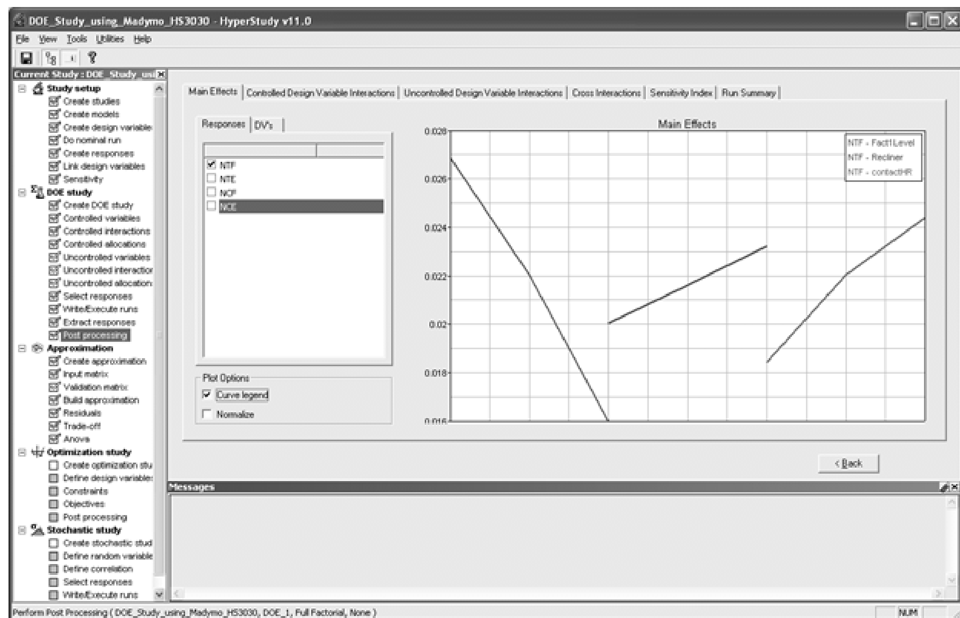


图 18-18　NTF 的影响

（3）重复第二步，观察设计变量对不同的响应的影响。

（4）选择 Controlled Design Variables Interactions 页面，观察两个不同变量的交互作用。

（5）选中 C0-C1，可以看到第一个变量 Fact1Level 和第二个变量 Recliner 的交互作用，如图 18-19 所示。

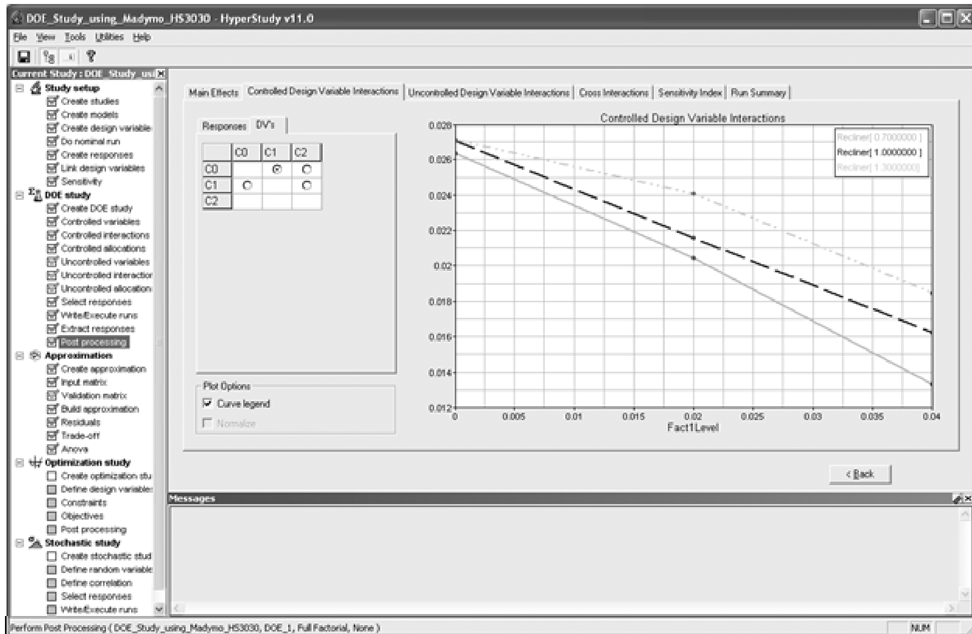


图 18-19　交互作用曲线

（6）重复第五步观察 NTF 响应下 C0-C2 (Recliner and contactHR)和 C1-C2 (Fact1Level and contactHR)的交互作用。

STEP 07 创建近似代理模型

（1）在结构树里单击 Create approximation，基于各个响应的近似模型可以被建立，在以后的参数优化中可以用到近似模型进行优化。

（2）单击 Add。

（3）选择 Approximation Type：Least Squares Regression，确保 Add to all 被选中。

（4）单击 OK 按钮。

（5）单击 Next 按钮。

（6）单击 Import Matrix 并选择 doe_1。

（7）单击 OK 按钮。

（8）单击 Next 按钮，进入建立近似模型页面，默认是二阶近似模型。

（9）单击 Next 按钮，进入 Residuals 页面，评估数据拟合的准确性。

（10）观察一下其他的响应。

（11）在结构树下选择 Anova，评估每个响应下的每个变量的贡献百分比。

18.5　实例：集成 FLUENT 的 DOE 分析和优化研究

本实例将介绍如何使用 HyperStudy 和 FLUENT，对 90°弯管（见图 18-20）横截面改变而引起的压力损失变化进行 DOE 研究。

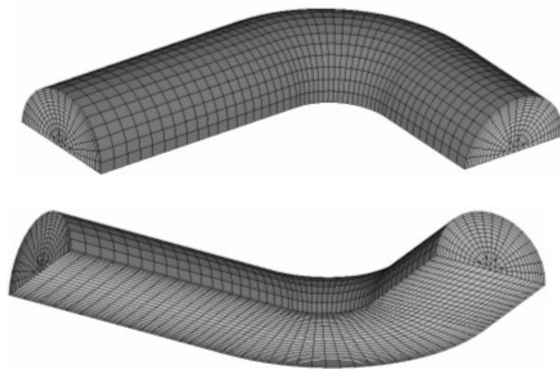


图 18-20　弯管模型

本实例的内容包括以下几个方面：

- ✓ 使用 HyperMorph 和 HyperStudy 参数化模型。
- ✓ DOE 分析。
- ✓ 后处理 DOE 结果。

本实例路径下包含如表 18-1 所示的文件。

表 18-1　本实例所需的文件

elbow.hm	HyperMesh 模型网格文件
fluent.bat	FLUENT（Windows）定制执行脚本
fluent.sh	FLUENT（UNIX）定制执行脚本
fluent_options.txt	FLUENT 定制命令行选项
fluent_batch.jou	FLUENT journal 文件样板。没有注释语句的文件内容如下： file confirm-overwrite no file rc case_file_prefix file rd "base_directory_name/case_file_prefix" solve iterate 1000 file write-dat case_file_prefix exit

STEP 01　在 HyperMesh 中导入模型

（1）启动 HyperMesh。

（2）默认情况下出现 User Profiles 对话框。该对话框也可以从 Preferences 的下拉菜单中选择 User Profiles 打开。

（3）在 User Profiles 中选择 CFD，单击 OK 按钮。

（4）选择打开 elbow.hm。该网格包括 fluid 的 3D 单元，inlet、outlet、wall 和 symm 的 2D 单元。

（5）单击打开 Export 标签，如图 18-21 所示。

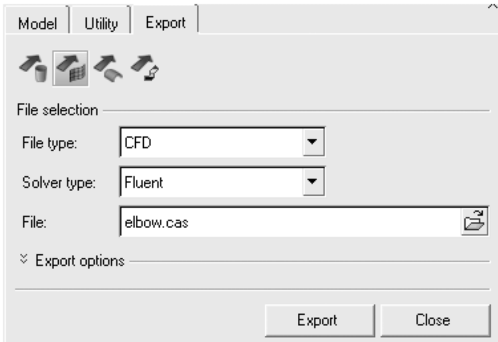


图 18-21　文件导入

（6）在 File type 下拉列表中选择 CFD，在 Solver type 下拉列表中选择 Fluent。

（7）在 File 文本框中输入 elbow.cas，单击 Export。在接下来弹出的对话框中选择 No，完成后将提示保存 elbow.cas 文件。

（8）单击 OK 按钮关闭窗口，退出 HyperMesh。

STEP 02　FLUENT 基准模型模拟

（1）打开 FLUENT (3ddp)，Mode (Full Simulation)。

（2）选择 File→Read→Case，导入模型，如图 18-22 所示。

（3）选择上一步创建的 elbow.cas，读入后的信息如图 18-23 所示。

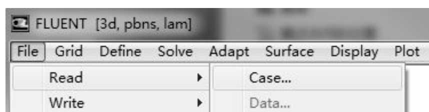


图 18-22 模型导入

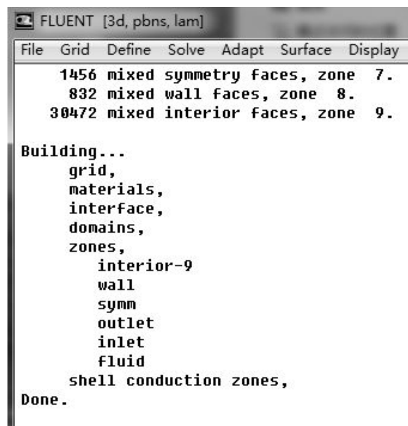


图 18-23 文件信息

（4）选择 Grid→Scale，缩小网格。假设模型单位是 mm，在各方向输入 1000，单击 Unscale 可以将网格缩小 1000 倍。缩小后 X 的范围是[-0.01, 0.06]。

（5）对于流体介质（空气），湍流模型（层流）保持默认的设置。

（6）选择 Define→Boundary Conditions→Inlet。

（7）设置 Inlet 类型为 Mass-Flow，大小为 0.01 kg/s。

（8）选择 Direction Specification Method 为 Normal to Boundary。

（9）单击 OK 按钮。

（10）选择 outlet，类型设置为 pressure-outlet.

（11）默认 0Pa 的压强，单击 OK 按钮。

（12）保持另外两个边界条件（symm 和 wall）为默认设置。对于 DOE，需要监测进口表面的平均压力。

（13）选择 Solve→Monitors-Surface。

（14）将 Surface Monitors 的数目增加为 1。

（15）对于 monitor-1，选中 Plot 和 Write。

（16）单击 Define，选择 Report Type：Area-Weighted Average。

（17）保持 Report of：Pressure 和 Static Pressure 为默认设置。

（18）确保 Surfaces 中的 inlet 被选中。选择 Plot Window 1，保持默认文件名为 monitor-1.out。该文件将会被 HyperStudy 在 DOE 或优化时调用。对于 Windows 和 UNIX，确保 monitor-1.out 不包含路径信息，否则该文件将在指定路径下生成，而我们需要它在执行路径下生成。

（19）单击 OK 按钮两次。

（20）选择 Solve→Monitors-Residual。

（21）选中 Print，在 Normalization check 对话框选中 Normalize。

（22）保持其他默认设置，单击 OK 按钮。

（23）保存 FLUENT 的 case 文件。在 File 菜单栏中选择 Write→Case。

（24）命名 Case File 为 elbow.cas。

（25）单击 OK 按钮（接受覆盖提示）。

（26）初始化 FLUENT 模拟。从菜单栏中选择 Solve→Initialize→Initialize。

（27）在 Compute From 对话框下，选择 inlet，单击 Init。

（28）单击 Close。

（29）开始准备计算，在 Solve 菜单栏下选择 Iterate，设置迭代数为 1000.

（30）单击 Iterate。结果约在 100～160 步中收敛，取决于求解器的版本。最大的气流速度约为 85 m/s。

（31）选择 Report→Surface Integrals。

（32）选择 Report Type 为 Area-Weighted Average。保持 Field Variable：Pressure 和 Static Pressure 为默认设置。

（33）对 Surfaces 选择 inlet。

（34）单击 Compute，压力值约为 406Pa。同样的值也可以在当前路径 monitor-1.out 文件中的最后一行看到。

（35）保存结果。从 File 菜单栏下选择 Write→Data。

（36）保留默认的文件名 Elbow.dat，单击 OK 按钮。

（37）保存 case 文件。从 File 菜单栏下选择 Write→Case。

（38）保留默认的文件名 Elbow.cas，确保不勾选中 Write Binary Files。

（39）单击 OK 按钮。由于在进行 DOE 或优化时需要直接读取 case 文件，因此不要保存成二进制形式，如图 18-24 所示。

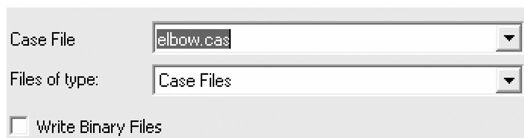


图 18-24　保存 case 文件

（40）退出 FLUENT。下面将 elbow.cas 导入到 HyperMesh 中建立外形变量，用来进行 DOE 或优化。

STEP 03 在 HyperMesh 中加载模型

（1）启动 HyperMesh。在 User Profile 对话框中选择 CFD，单击 OK 按钮。

（2）在 Utility 标签中选择 CFD/IO。

（3）单击打开 Import 标签。在 File type 下拉列表中选择 CFD，在 Solver type 下拉列表中选择 Fluent。

（4）在 File 中浏览到 elbow.cas，单击 Import 导入。

（5）在弹出的覆盖提示中单击 Yes。在 Model 标签下可以看到 5 个 component，如图 18-25 所示。

（6）只显示 fluid Component。

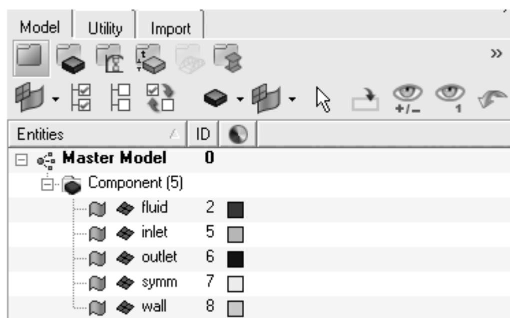


图 18-25　模型树

STEP 04 使用 HyperMorph 进行外形参数化

（1）在 Morphing 菜单栏下，单击 domains 打开创建参数化外形的 domain 面板。在本实例中，domain 可以自动创建。

（2）选择 3D domains 和 elems，如图 18-26 所示。

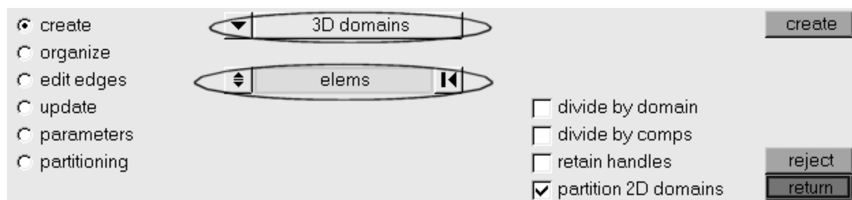


图 18-26　单元选择

（3）选择 ，选择 left。

（4）单击 elems→by window，选择 90°弯管的所有弧形区域的单元，不要选择直段区域的网格，如图 18-27 所示。

（5）单击 create 按钮，生成的 domain 如图 18-28 所示。

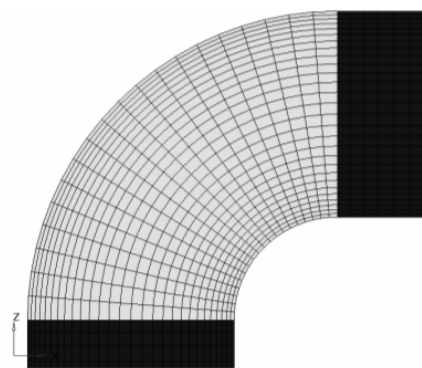


图 18-27　单元选择

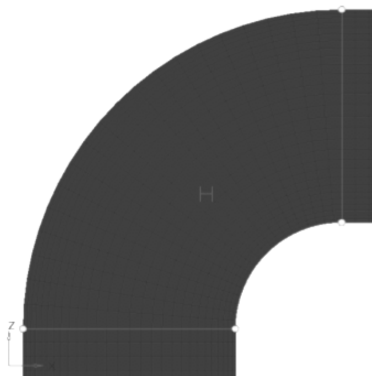


图 18-28　生成 domain

（6）单击 return 按钮。

（7）在 Morphing 菜单栏下单击 handles，转到如图 18-29 所示的面板。

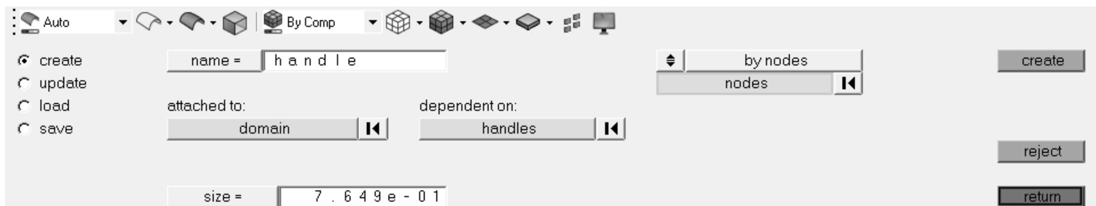


图 18-29 Morphing 面板

（8）选择两个节点：一个在内圆弧上，另一个在外圆弧上（都在对称平面上，离两端的 handles（黄色）距离相等）。单击 create 按钮，会生成两个新的 handle，如图 18-30 所示。

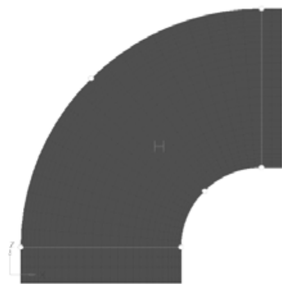


图 18-30 生成 handle

（9）单击 return 按钮。.

（10）单击 morph 按钮打开网格变形面板。目标是创建两个设计变量以改变弯管的内外半径大小。

（11）单击 set biasing 按钮。

（12）选择最后生成的两个 handle，如图 18-31 所示。

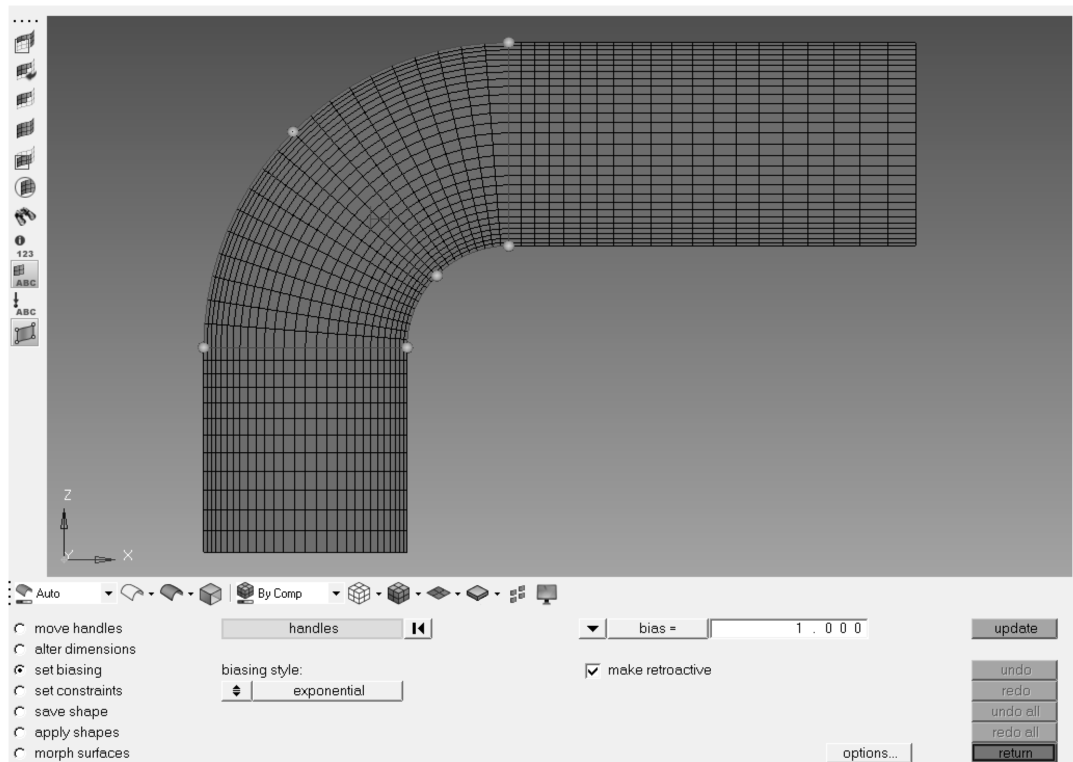


图 18-31 最后生成的两个 handle

（13）设置 bias =为 2.000。
（14）单击 update。
（15）单击 move handles。
（16）改变上端的选项为 translate，底部的选项为 along xyz。
（17）输入 x val = 0.001。
（18）输入 z val = −0.001。
（19）选择内圆弧的中间 handle，如图 18-32 所示。

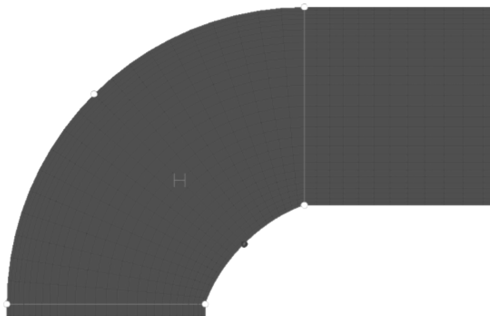


图 18-32　handle 选择

（20）单击 morph，产生第一个外形。
（21）改变按钮为 save shape，设置成 as node perturbations。
（22）命名为 sh1。
（23）单击 Save 按钮。
（24）单击 undo 准备下一个外形的生成。
（25）单击 move handles 按钮。
（26）改变上端选择按钮为 along xyz。
（27）输入 x val = −0.002。
（28）输入 z val = 0.002。
（29）选择外圆弧的中间 handle。
（30）单击 morph，产生第二个外形，如图 18-33 所示。

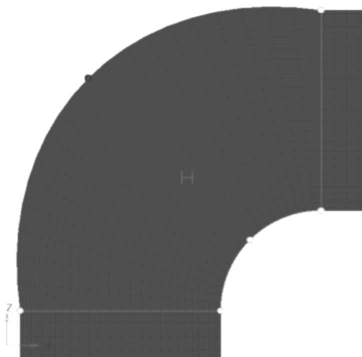


图 18-33　形状变化

（31）改变按钮为 save shape。

（32）shape =命名为 sh2。

（33）单击 Save 按钮。

（34）单击 undo 回到初始网格。

（35）单击 return 按钮两次退出面板。

STEP 05 从 HyperMesh 中导出参数化外形

（1）在 Analysis 页面选择 optimization 面板。

（2）单击 shape。

（3）确保左上方的 desvar 按钮被选中，并将 single desvar 设置成 multiple desvars。

（4）单击 shapes，选中 sh1 和 sh2，单击 select 按钮。

（5）单击 create 按钮，为每个所选的外形创建一个外形设计变量。单击 animate 按钮，可以观察各个外形。通过 deformed 面板，可以单击 modal 或 linear 观察外形变化，如图 18-34 所示。

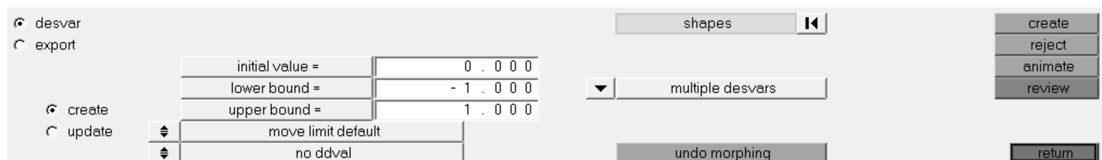


图 18-34　查看面板

（6）单击 return 按钮退出所有面板。

（7）将 Utility 标签切换到 CFD/IO。

（8）在 Export files for FLUENT 中选择 Shapes，如图 18-35 所示。出现提醒是否所有的 volume 单元显示而 2D 单元不显示的警告。

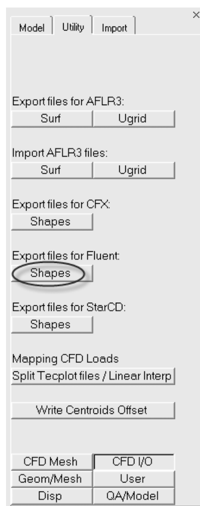


图 18-35　按钮选择

（9）单击 Yes 按钮。

（10）选择初始的已保存成 ASCII 形式的 FLUENT case 文件（Elbow.cas），导入到 HyperMesh，单击 Open。

（11）弹出图 18-36 所示的信息。

（12）单击 OK 按钮，弹出如图 18-37 所示的信息。

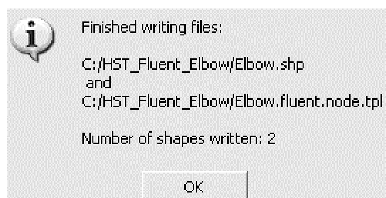


图 18-36 信息窗口（一）

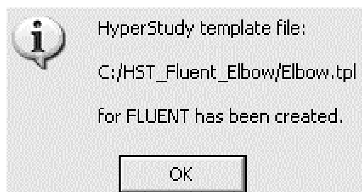


图 18-37 信息窗口（二）

将会生成下面的 3 个文件。

elbow.shp：由 elbow.fluent.node.tpl 读取的网格变化向量数据。

elbow.fluent.node.tpl：网格坐标样板。

elbow.tpl：HyperStudy 读取的 Fluent case 样板。

STEP 06 开始 study

（1）在 HyperMesh 里单击 Applications 下拉菜单。

（2）选择 HyperStudy。

（3）另外，如果 HyperMesh 没有启动，可以通过开始菜单启动 HyperStudy。

STEP 07 注册 FLUENT 为求解器

为了使 FLUENT 作为求解器，需要使用一个脚本（Windows 下使用 fluent.bat）作为 HyperStudy 的配置文件。从<install_directory>/tutorials/hst/Fluent 复制 fluent.bat（UNIX 系统下 fluent.sh）到 c：/，该文件包含以下两行特定的命令需要用户自定义编写。

✓ set ALTAIR_HOME=C：/Altair<platform>/hw11.0build

✓ set FLUENT_EXE=C：/Fluent.Inc/ntbin/ntx86/fluent.exe

（1）进入 HyperStudy Tools 下拉菜单调用该脚本。

（2）选择 Register Solver Script。

（3）单击 Add。

（4）在 Label 文本框中输入 Fluent。

（5）在 Variable 文本框中输入 Fluent。

（6）浏览并选择正确的求解器 Script。

（7）单击 OK 按钮。

（8）使用 Save as 可以重命名预置文件（如 userprefs.mvw），确保不要覆盖<install_directory>/hw 下的系统默认文件。在 UNIX 系统下，配置文件可以放在根目录或启动 HyperStudy 的工作路径下。

（9）当新建 HyperStudy 文件后，可以通过 File 下的 Set Preference File 加载配置文件。

（10）另外，可以用 Append 向当前预置文件增加命令，或单击 Close 按钮退出。

STEP 08 创建 study

（1）在 Create Studies 窗口中单击 Add Study。

（2）选择 New。

（3）保持其他默认设置单击 OK 按钮。

（4）在右上方的窗口中选择作为 Study directory 的工作路径。

（5）单击 Next 按钮弹出 Create models 窗口。

（6）单击 Add model。

（7）设置 Model type：Template 并单击 OK 按钮添加一个新的模型。

（8）在右上方的窗口中浏览选择 Template 文件 Elbow.tpl。

（9）单击 Next 按钮弹出 Create design variables 窗口。设计变量的上/下限值可以更改。

（10）选择第一行，该行是关于 sh1 的信息，左边的箭头表示选中的行。

（11）保持默认的 Mode Continuous。

（12）选择第二行，该行是关于 sh2 的信息。

（13）保持默认的 Mode Continuous。

（14）单击 Next 按钮弹出 Do nominal run 窗口。

（15）在 Solver input file 区域，输入 elbow.cas。这是 HyperStudy 为 FLUENT 生成的输入文件。

（16）选择 FLUENT 作为 Solver execution script。输入 FLUENT 文件是 elbow.cas，Solver input arguments 保持默认设置，如图 18-38 所示。

Model	Solver input file	Solver execution script	Solver input arguments
Model_1	hat.parm	Fluent	$file

图 18-38　求解设定

添加自定义文件：

该部分针对用户系统安装了多个 FLUENT 版本，用户可以添加一个自定义的 FLUENT 运行文件。文件的名字是 Fluent_options.txt，并置于 HyperStudy 的主目录下。教程路径<install_directory>/tutorials/hst/Fluent 下包含了如下命令：

```
FLUENT_OPTS = -r6.3.26 3ddp -hidden -i Fluent_batch.jou
```

其主要目的在于选择要使用的 FLUENT 版本（本实例使用 6.3.26），采用双精度而不是默认的单精度。当系统有多个 FLUENT 版本时需要制定使用的版本，否则 FLUENT 将中止执行批处理命令。更多的信息可以在样本文件中查到。

典型的并行计算设置为–tn –cnf=AbsoluteDirPath/hosts.txt，其中–tn 表示处理器的个数（如–t4 表示 4 个处理器计算），文件 hosts.txt 包含了主机的信息。文件名字不要有空格。关于更详细的并行计算，见 FLUENT 的说明文档。

另一个十分重要的 HyperStudy 主目录下文件是 FLUENT 的 journal 文件 Fluent_batch.jou。该文件包含了 FLUENT 在每个执行子目录下的主要工作。在 HyperWorks 的安装子路径 hw11.0/tutorials/hst/Fluent 下可以找到一个示例文件。不要改变关键词 case_file_prefix 和 base_directory_name，它们在运行时自动替换。对于一个 nominal run，迭代次数（1000）是不重要的，其取决于模拟的类型，因此实际的迭代步数是需要改变的。也可以对该 journal 文件增加其他的命令满足其他模拟的需要，如后处理或提取想要的任何数据。下面是针对默认的 Fluent_batch.jou 修改版本用于更改检测的残差。

```
file confirm-overwrite no
file rc case_file_prefix
file rd "base_directory_name/case_file_prefix"
/solve/monitors/residual/monitor y y y y
/solve/monitors/residual/check-convergence y y y y
/solve/monitors/residual/convergence-criteria 1.e-4 1.e-3 1.e-3 1.e-3
solve iterate 1000
file write-dat case_file_prefix
exit
```

查看 FLUENT 的命令表，里面有对 Fluent_batch.jou 中命令的所有说明。

STEP 09 执行 base run

（1）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，或者单击 Write/Execute 按钮。当 FLUENT 运行完成后将弹出一个窗口。

（2）单击 OK 按钮，查看 Messages 确保没有错误，如图 18-39 所示。

```
Messages
 37 Message: Model files written for ( run (    1/1 ) )
 38 Message: Begin model execution ( Model_1 (m_1) ) - ( run (    1/1 ) )
 39 Message: End   model execution ( Model_1 (m_1) )
```

图 18-39　Message 信息

运行目录下生成 nom_run/m_1 子目录，其中包含 beam.out，beam.oslog 和 beam.h3d 等结果文件。还有由 HyperStudy 生成的 FLUENT 输入文件 elbow.cas。Fluent_run_sh.log 是 HyperStudy 脚本执行的记录文件； Fluent_batch_out.txt 是 FLUENT 运行后的输出文件，里面包含了许可证或运行问题等信息。

（3）单击 Next 按钮，弹出 Create responses 面板。

STEP 10 创建响应

（1）单击 Add Response。

（2）保持默认值，单击 OK 按钮。

（3）单击 Response_1。

（4）单击 Expr Builder，HyperStudy-Response Expression Builder 窗口出现。

（5）在 Vectors 标签中单击 Add，添加一个矢量 Vector 1。该矢量需要进一步定义。在 Vector resource file 区域从 nom_run/m_1 子目录下选择 monitor-1.out，如图 18-40 所示。

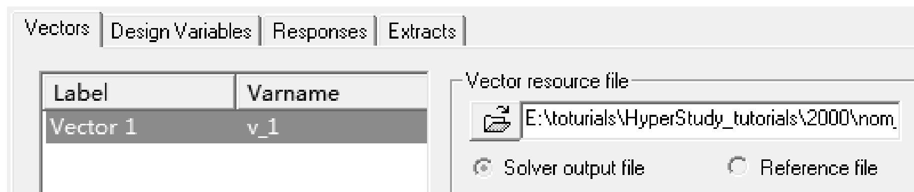


图 18-40　向量添加

这是一个两列的文件（迭代结果），如下所示：

160 406.05
161 403.96

需要注意的是，随着迭代的进行，压力的平均值也在不断变化。通过减小残差可以减小改变的幅度。

（6）在 Request 下选择 Request 1。

（7）在 Component 下选择 Component 2（提取第二列的值）。

（8）在 Response expression 区域输入 v_1[numpts(v_1) – 1]。该表达式提取了 monitor-1.out 文件第二列最后一行的值。

（9）选中 Evaluate response expression。

（10）表达式 v_1[numpts(v_1) – 1] 的值最后应为 403.961。

（11）单击 OK 按钮。

（12）单击 Next 按钮直到 Continue To 出现。

至此完成了设置，接下来设置计算的形式。

STEP 11 DOE

（1）单击 Add DOE Study。

（2）保持其他默认设置，单击 OK 按钮。

（3）在 Controlled factors 下，设置 DOE Class 为 Full Factorial。

（4）单击 Next 按钮直到弹出 Controlled variables 对话框。

（5）选择 sh1，增加 No. of levels 到 3。

（6）同样选择 sh2，增加 No. of levels 到 3。

（7）单击 Next 按钮直到弹出 Controlled interactions 对话框，单击 Next 按钮直到弹出 Controlled allocations 页面。该页面将自动显示生成的设计矩阵，包含 9 个设计变量的设计

组合。

（8）单击 Next 按钮，弹出 DOE responses 对话框。

（9）观察响应值。

（10）单击 Next 按钮。

（11）运行窗口出现，显示了所有的计算，如图 18-41。

DOE Run Table | DOE Run Plot | DOE Run 3D Plot

Runs	State	sh1	sh2
1	☑	-1.0000000	-1.0000000
2	☑	-1.0000000	0.0000000
3	☑	-1.0000000	1.0000000
4	☑	0.0000000	-1.0000000
5	☑	0.0000000	0.0000000
6	☑	0.0000000	1.0000000
7	☑	1.0000000	-1.0000000
8	☑	1.0000000	0.0000000
9	☑	1.0000000	1.0000000

图 18-41　显示所有的 DOE 计算组合

（12）单击 Write 按钮/Execute 按钮。

（13）在弹出的对话框中选择 Yes。执行所有的计算。

（14）单击 Next 按钮，弹出 Extract responses 页面。

（15）单击>> Extract >>。该步提取了 9 个运行结果的响应，可以看到 case 9，即 sh1 = sh2 = 1.0 时进口的平均压力最小。这个很容易理解，因为该 case 的弯管截面面积最大。另外两个最低的值是 case 6 和 8，它们的变量值分别为 1.0 和 0.0。

（16）单击 Next 按钮，弹出 Post-processing 窗口。

（17）单击 Save 选择 Save Current Study。

STEP 12 后处理 DOE 结果

（1）在导航树中，单击 Create approximation.

（2）单击 Add，弹出 Add Approximation 窗口。

（3）保持默认设置 Least Square Regression，单击 OK 按钮。

（4）单击 Next 按钮。

（5）单击 Import Matrix 弹出 Import DOE 窗口。

（6）单击 OK 按钮。

为了创建近似，过滤掉 Run1，因为其响应值太大，是最小响应值（Run9）的两倍多。选中 Run1，单击 Delete Row，留下八行。

（7）单击 Next，按钮转到 Build approximation，保持默认的两阶回归，如图 18-42 所示。

（8）单击 Next 按钮，可以看到 Residuals 的近似值。

（9）可以看到最大的误差约在 1.8%。有 3 种不同的方式可以查看近似误差(Table、Scatter Plot 和 Bar Chart)。

（10）单击 Next 按钮，分析近似值，查看 3D 图，如图 18-43 所示。

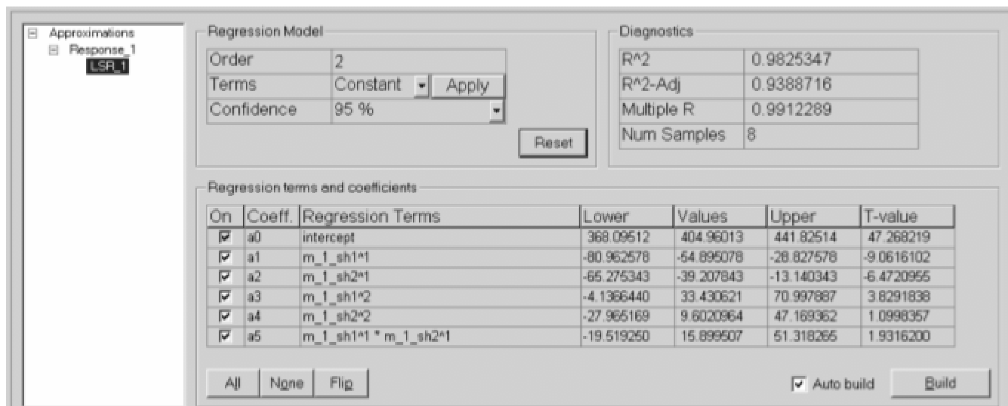


图 18-42　拟合设置

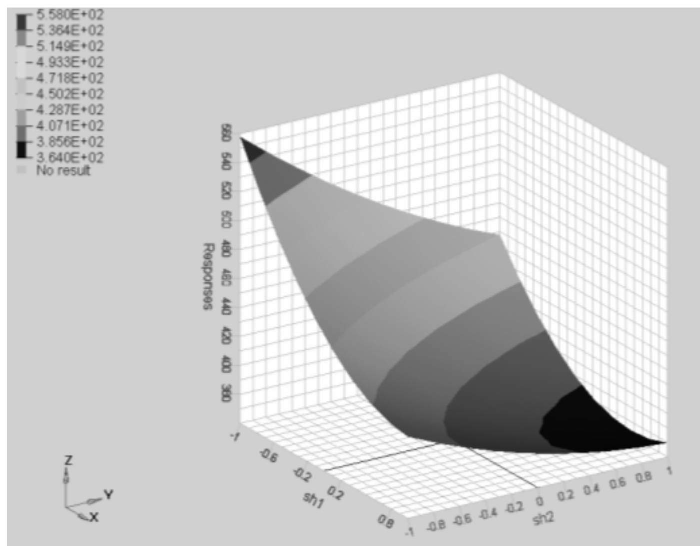


图 18-43　拟合结果 3D 显示

STEP 13 利用 DOE 结果做个简单的优化

（1）在浏览树 Optimization Study 下单击 Create optimization study。

（2）单击 Add Optimization，保持其他默认设置单击 OK 按钮，确保 Optimization Engine 是（ARSM）Adaptive Response Surface Method。

（3）单击 Next 按钮，转到 Define design variables，保持默认设置不变。

（4）单击 Next 按钮，转到 Constraints，不使用约束。

（5）单击 Next 按钮，转到 Objectives。

（6）单击 Add Objective。

（7）确保 Objective 设置为 Minimize 并将 Evaluate From 改为 LSR_1，如图 18-44 所示。

采用 LSR_1 方法的原因是计算很快。一般来说，CFD 分析需要大量的 CPU 时间。如果选择 Solver，则需要在优化过程中的每一步迭代中运行 FLUENT 进行求解，这需要大量的 CPU 时间。

基于最小二乘法的优化速度很快，而且可以将 Relative convergence 公差设置到 0.1%，如 18-45 所示。

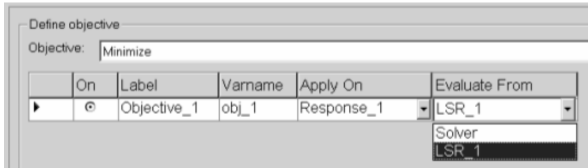


图 18-44　选择 LSR_1

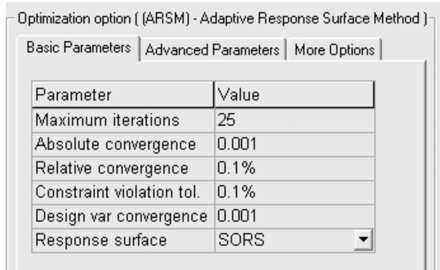


图 18-45　优化设置

（8）单击 Launch Optimization 转到 Post processing 窗口。

（9）单击 Optimization Iteration History Table 标签，减小 LSR_1 近似值将使得 Response_1 值的渐进减小，随之 sh1 和 sh2 越接近它们的最大值。

在 FLUENT 计算时采用默认的残差收敛准则，忽略残差带来的压力结果影响，当 sh1=sh2=1 时的压降为 367.1 Pa。然而当（sh1=0, sh2=1）和（sh1=1, sh2=0）时，压降并没有那么大。这解释了当 sh1 和 sh2 比较接近但又不等于最大值时，LSR_1 近似方法使得响应值渐近减小的原因。另外，当 sh1 和 sh2 接近 1 时，近似方法预测的值比实际值稍小。该部分简易优化的目的在于对基于 DOE 结果的优化步骤进行演示。

本实例阐述了 DOE 研究的主要步骤，并根据 DOE 结果进行了近似方法研究，并采用 LSR 进行了一个简易的形状优化，节省了 CPU 时间和解算周期。HyperMesh 为 FLUENT 计算生成参数化的流体网格。然后采用 HyperStudy 和 FLUENT 进行 DOE 测试和优化研究。在本实例中引入了一些简单的模型假设（如层流），但所介绍的步骤完全可以应用到任何复杂的 CFD 分析中。

18.6　实例：集成 AcuSolve 的 DOE 分析

本实例演示了如何使用 HyperStudy 和 AcuSolve，采用 HyperMorph 参数化设计外形，分析弯管（见图 18-46）形状变化后流动的变化并进行 DOE 分析。

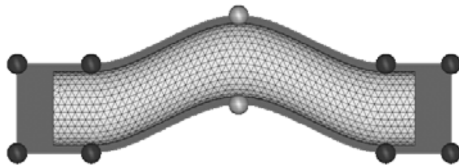


图 18-46　有限元模型

本实例包括如下内容：

✓ 采用 HyperMorph 和 HyperStudy 参数化模型。

✓ AcuSolve 和 HyperStudy 耦合。

✓ 进行 DOE 分析并运行。

上述路径下包含以下文件：

pipe.hm：HyperMesh 网格文件。

run_acusolve.bat：AcuSolve 定制执行文件（Windows）。注意批处理文件需适应当前工作目录。

完成基准模拟后，需要进行 DOE 研究来分析弯管形状变化后引起进出口的压降变化。该例是综合应用 AcuSolve、HyperMesh 和 HyperStudy 的一个示例。DOE 或优化研究基于基础模拟，该模拟需要在 AcuSolve 中已计算完成。为了该实例的完整性，该实例也描述了基准模型模拟的一般过程。为此，需要 HyperMesh 生成的基础模型的网格文件 pipe.hm。

STEP 01 在 HyperMesh 中加载模型

（1）启动 HyperMesh。

（2）默认出现 User Profiles 对话框。该对话框也可以从 Preferences 下拉菜单中选择 User Profiles 打开。

（3）在 User Profiles 中的 Engineering Solutions 下选择 CFD，单击 OK 按钮。

（4）选择打开 pipe.hm，导入模型，如图 18-47 所示。

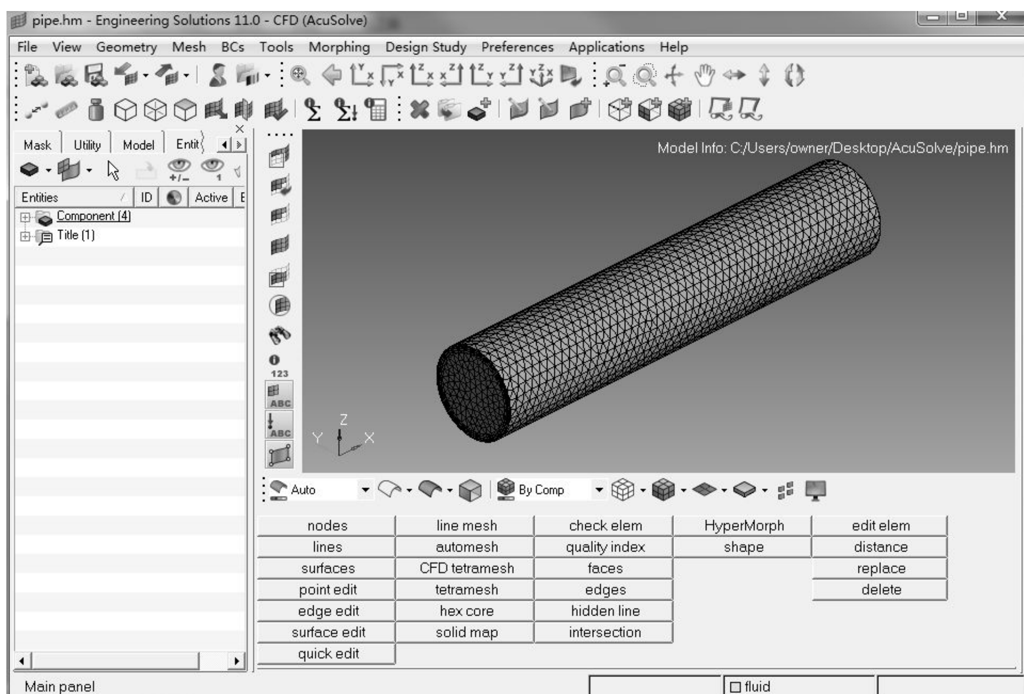


图 18-47　模型导入

（5）打开导出面板，在 File Type 处选择 CFD，在 Solver Type 处选择 AcuSolve，文件命名为 pipe.inp，单击 Export。

（6）对弹出的提示选择 Yes，生成如图 18-48 所示的文件。

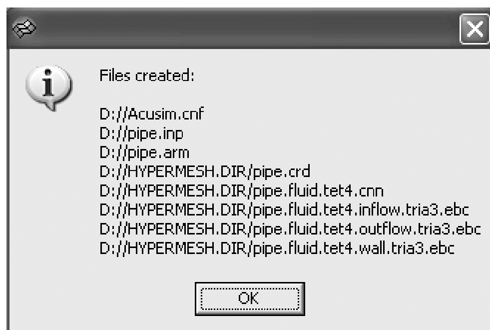


图 18-48　信息提示窗口

STEP 02 完成初始模型 CFD 分析

（1）打开 AcuSolve 的前处理器 AcuConsole。

（2）从菜单栏中选择 File 下的 New，新建一个模型文件 pipe.acs。

（3）选择 File 中的 Import，选择 pipe.inp 文件，单击 Open 按钮。

（4）将 Display type 设置为 solid & wire，如图 18-49 所示。

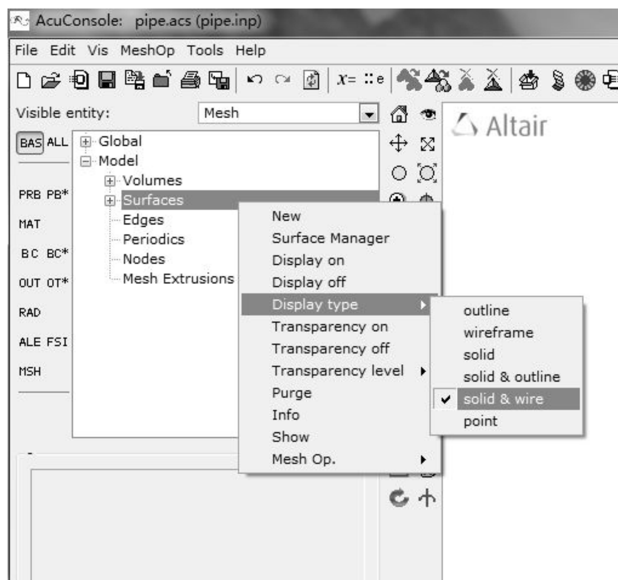


图 18-49　设置模型显示方式

（5）设置 Inflow type：Mass flux 的大小为 0.0003 kg/sec。

（6）保存模型。

（7）单击运行 AcuSolve，在结束的对话框下单击 OK 按钮，生成一个新的存放结果文件的文件夹 ACUSIM.DIR。

（8）退出 AcuSolve。

STEP 03 Morphing

（1）回到 HyperMesh 中的 pipe.hm 模型。

（2）在 Morph Volumes 面板中选择 create，在 enclose elems 下选择 all，单击 create 按钮。

（3）切换到 split/combine 子面板，在如图 18-50 所示的绿色十字处单击两次，然后单击 split。

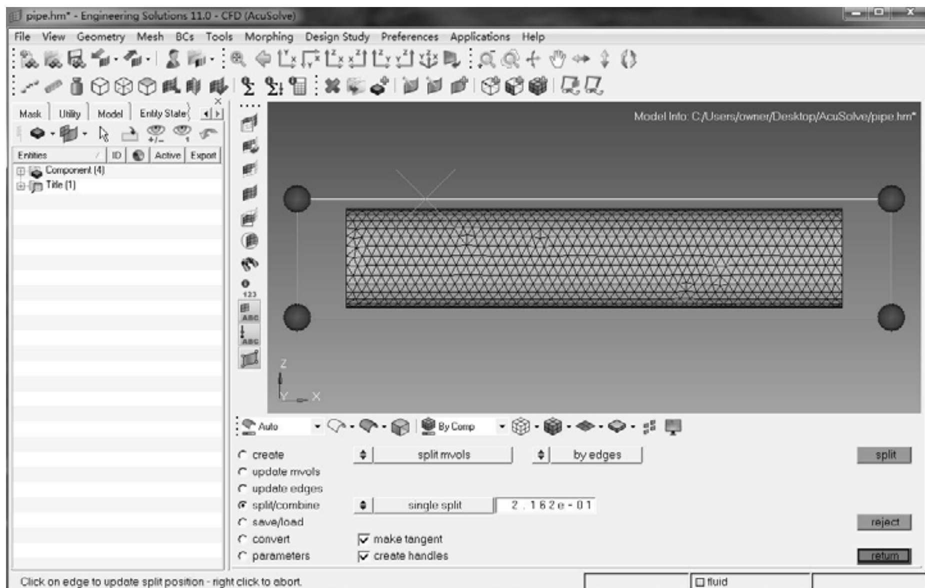


图 18-50　选择位置示意图

（4）继续分割模型如图 18-51 所示。

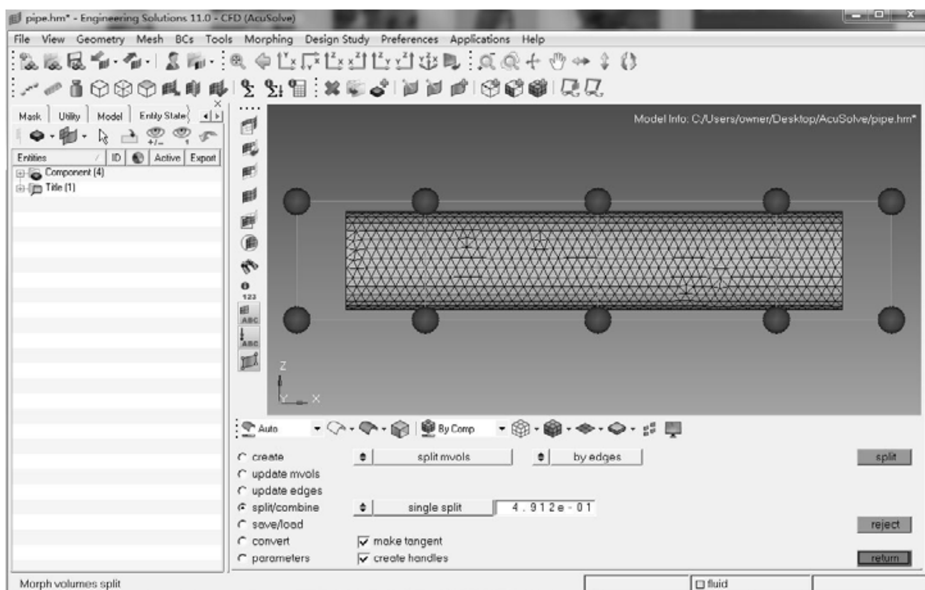


图 18-51　模型分割图

（5）切换到 update edges 子面板，选择 update ends，将两个 volume 间的 edges 的关联切换成 master-slave。

（6）选择第一条边定义为 master，选择邻近的边为 slave。对所有边重复这一操作直到显示如图 18-52 所示的界面。

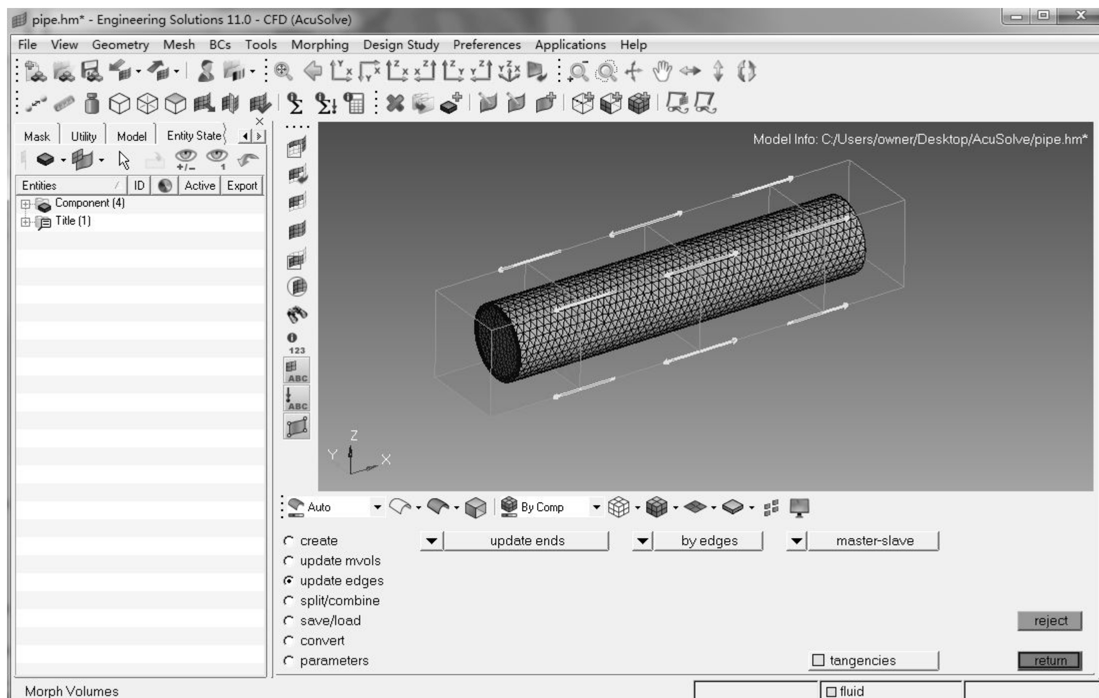


图 18-52　模型边操作

（7）单击 return 按钮转到 morph 面板。

（8）使用 movehandles 子面板改变网格形状。

（9）选择中间 4 handles（灰白色所示），使用 translate 模式（interactive, along vector, y-axis 和 dist= 0.01）移动。

（10）单击 morph，如图 18-53 所示。

（11）从 save shape 子面板中选择 as node perturbations, name= the shape 为 s1，单击 yes。

（12）在模型树中右键单击选择 Hide 隐藏模型。

（13）保存 HM 文件。

（14）采用 UndoAll 撤销变形。

（15）单击 File 下的 Save as，保存模型为 pipe_with_shape.hm。

（16）下一步是清理模型。

（17）在 Utility 标签中选择 Disp，然后单击 Clear Temp Nodes。

下面创建设计变量。

（18）在 shape 面板中选择 desvar 子面板，命名新变量。

（19）选择 s1 并单击 create 按钮。下一步导出外形。

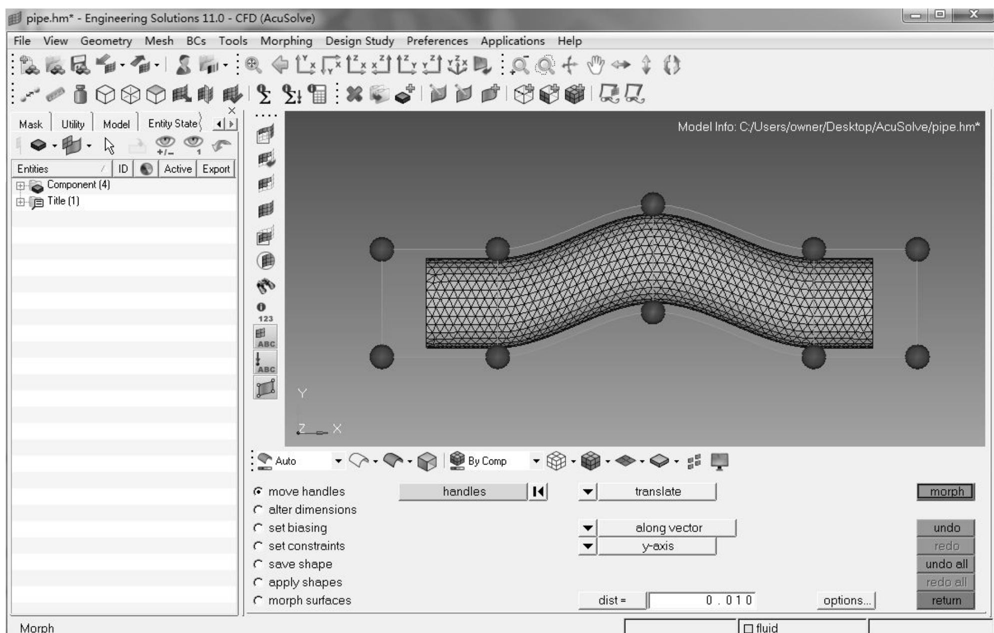


图 18-53　网格变形

（20）在 shape 面板中单击 export 按钮，进行如下设置。

analysis code：HyperStudy。

sub-code：User Format。

（21）单击 edit/export，并保持如图 18-54 所示的默认设置。

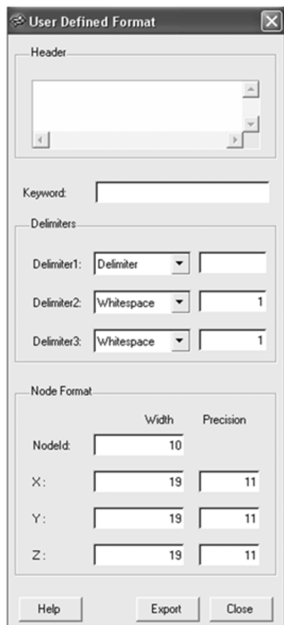


图 18-54　设置信息

（22）选择 export 并保存为 pipe_shape.shp。

（23）路径下还自动生成了 pipe_shape.user-format.node.tpl 文件。

STEP 04 启动 HyperStudy 并参数化模型

（1）启动 HyperStudy。
（2）在 Create Studies 窗口中单击 Add Study。
（3）选择 New。
（4）保持默认设置，单击 OK 按钮，在右上的窗口中选择工作路径为 Study directory。
（5）单击 Next 按钮转到 Create models 页面
（6）选择 Add Model 下的 Template，添加模型。
（7）选择 pipe_shape.user_format.node.tpl 文件，可以在 Create Design Variable 中看到设计变量 dv1 及其上、下限。

STEP 05 基准模型运行

（1）单击 Next 按钮转到 Do nominal run 页面。
（2）选择 Tools 下的 Register Solver Script 并增加一个求解器。
（3）label = AcuSolve。
（4）script = run_acusolve.bat（文件所在路径）。
（5）在 Do nominal run 页面，定义 Solver input file 为 pipe.crd，单击 return 按钮并选择新添加的 AcuSolve 求解脚本文件。保持 Solver input arguments 不变。
（6）单击 Write 按钮，然后单击 Execute 按钮，在 nom_run/m_1 文件夹中生成所有文件，并执行计算。如果计算顺利，将生成图 18-55 所示的文件。
（7）单击 Next 按钮。

ACUSIM.DIR
ENSIGHT.DIR
MESH.DIR
pipe.1.case
pipe.1.echo
pipe.1.Log
pipe.crd
pipe.inp
pipe.ss.inc
pipe_srf1.osi

图 18-55　文件列表

STEP 06 定义响应

（1）单击 Add Response。
（2）设置 Label 为 p_inflow, Variable：r_1，单击 OK 按钮。
（3）单击 Expr Builder，HyperStudy - Response Expression Builder 窗口出现。
（4）在 Vectors 标签中选择 Add 添加 Vector 1。
（5）在 Vector resource file 区域浏览到 nom_run/m_1 路径，选择 pipe_srf1.osi。
（6）在 Type，选择 Unknown。
（7）在 Request，选择 Block 1。
（8）在 Component，选择 Column2。
（9）单击 Apply，在 Response expression 区域，v_1 出现。它包含了 pipe_srf1.osi 文件中第二列所有的信息。

（10）将表达式编辑为 v_1[numpts(v_1)-1]。

（11）选中 Evaluate response expression。表达式的值应该接近 0.0753218，同时可以看到 nom_run/m_1 路径下.osi 文件的最后一行的值也是 0.0753218。

（12）单击 OK 按钮。

（13）单击 Next 按钮，直到 Continue To 出现。

选择将要进行的研究类型（DOE Study、Approximation、Optimization Study 或 Stochastic Study）。

STEP 07 DOE

（1）单击 Add DOE Study。

（2）保持其他默认设置，并单击 OK 按钮。

（3）在 Controlled factors 下设置 DOE Class 为 Full Factorial。

（4）单击 Next 按钮转到 Controlled variables 对话框。

（5）单击设计变量按钮，增加 No. of levels 为 5（Value 表格下的值显示为-1.0、-0.5、0.0、0.5 和 1.0）。

（6）单击 Next 按钮转到 Controlled interactions 对话框，再次单击 Next 按钮转到 Controlled allocations。该页面显示包含 5 种外形的设计矩阵。

（7）单击 Next 按钮弹出 DOE responses 对话框。

（8）复查响应。

（9）单击 Next 按钮，5 个计算 case 出现。

（10）单击 Write/Execute 按钮。

（11）在弹出的对话框中选择 Yes 执行所有的计算。

（12）单击 Next 按钮转到 Extract responses 页面。

（13）单击>> Extract >>，提取 5 个计算的响应，如图 18-56 所示。

DOE Run Table | DOE Run Plot | DOE Run 3D Plot

Runs	State	dv1
1	☑	-1.0000000
2	☑	-0.5000000
3	☑	0.0000000
4	☑	0.5000000
5	☑	1.0000000

图 18-56　提取 5 个计算的响应

（14）单击 Next 按钮转到 Post-processing 窗口，只激活 delta_p，如图 18-57 所示。

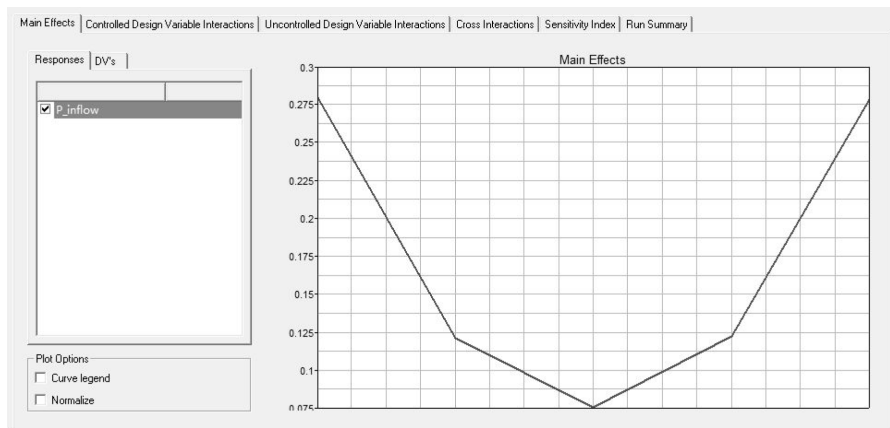


图 18-57　查看计算结果

（15）当 bend = -1、0 或 1 时分别对应的管子外形，如图 18-58 所示。

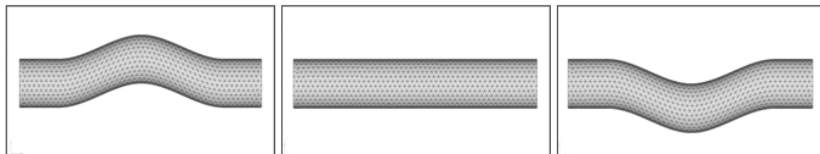


图 18-58　查看变形

（16）单击 Save 并选择 Save Current Study。DOE 的结果可以通过导入*.encase 文件使用 HyperView 查看，如图 18-59 所示。

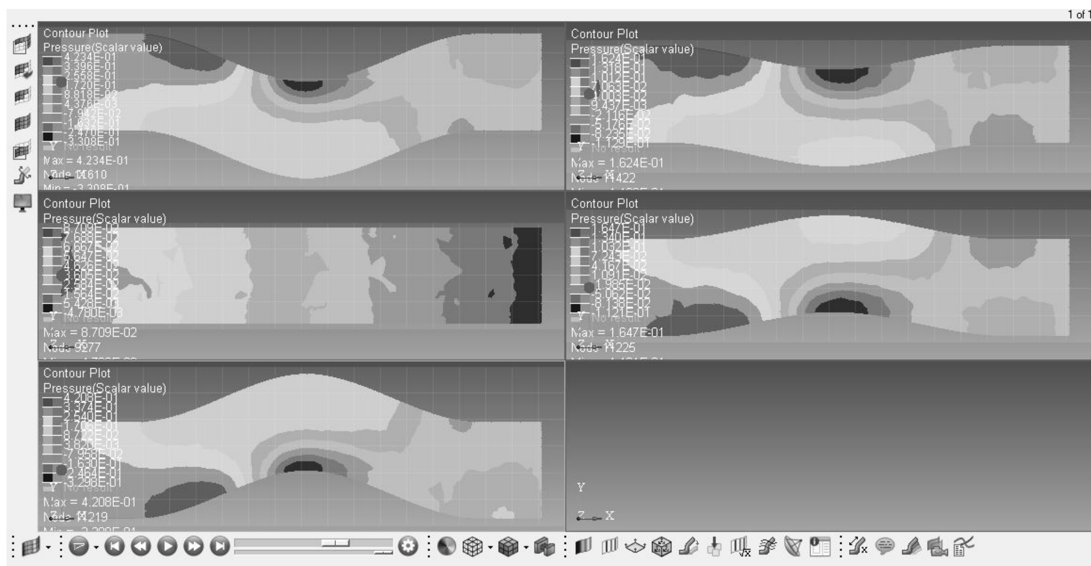


图 18-59　查看计算结果

18.7　小结

HyperStudy 集成其他求解器进行优化设计时，HyperStudy 本身的操作并不难，难点在于对其他求解器求解文件的调试，以及结果文件抽取等，因此如果读者对其他求解器很熟悉，采用 HyperStudy 这个优化引擎进行优化设计是很方便的。

在实际项目中，需要注意以下两点：

✓ 如果模型规模较大，则可能需要通过远程提交到高性能计算服务器上，这时计算环境的配置是项目成功的关键。

✓ 在进行形状优化设计时，常见的错误是到了某个迭代步某些单元变形太大导致单元质量不能满足要求从而计算终止，因此建立形状变量时就必须注意单元质量控制。另一个方法是计算终止后修改当前迭代步的网格模型，然后从当前迭代步重新提交计算。

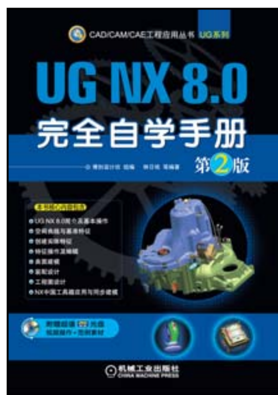
CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

打造 CAD 图书领域的“中国制造”

丛书特色

- **历久弥新**：为响应国家“两化融合”的号召，机工社历经十年倾力打造本系列丛书，从书每年重印率达 90%、改版率达 50%，已成为国内 CAD 图书领域的最经典套系之一。
- **专业实用**：从书内容涉及机械设计、有限元分析、制造技术应用、流场分析、建筑施工图、室内装潢图、水暖电布线图和建筑总图等，可以快速有效地帮助读者解决实际工程问题。
- **品种丰富**：本丛书目前动销品种近 200 种，产品包含了 CAX 领域全部主流应用软件和应用领域，包括 AutoCAD，UG，Pro/E，MATLAB，SolidWorks，HyperWorks，ANSYS，Mastercam，Inventor 等。
- **经典畅销**：经典畅销书层出不穷，累计销售过万册的品种达数十种。像《AutoCAD 室内装潢设计》、《UG NX 7.5 完全自学手册》、《Pro/ENGINEER Wildfire5.0 从入门到精通》、《ANSYS 结构分析工程应用实例解析》等书整体销量已过 3 万册。
- **配套资源丰富**：几乎每本书都提供配有书中实例素材、操作视频、PPT 课件等资源，方便读者的理解和学习，以达到事半功倍的效果。
- **金牌作者云集**：拥有一大批行业专家和畅销书作者，如唐湘民、韩凤起、钟日铭、江洪、张朝晖和张忠将等。

丛书介绍



书名：UG NX 8.0 完全自学手册 第 2 版

书号：978-7-111-38414-4

作者：钟日铭 等

定价：75.00 元

★本书以UG NX 8.0中文版为软件操作基础，结合典型范例循序渐进地介绍NX 8.0中文版的软件功能和实战应用知识。本书知识全面、实用，共分9章，内容包括UG NX 8.0入门简介及基本操作、草图、空间曲线与基准特征、创建实体特征、特征操作及编辑、曲面建模、装配设计、工程图设计、UG NX中国工具箱应用与同步建模。



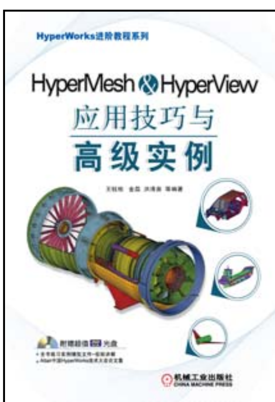
书名：SolidWorks 2011机械设计完全实例教程

书号：978-7-111- 36514-3

作者：张忠将 等

定价：62.00 元

★本书紧密结合实际应用，以众多精彩的机械设计实例为引导，详细介绍了 SolidWorks 从模型创建到出工程图，再到模型分析和仿真等的操作过程。本书实例涵盖典型机械零件、输送机械、制动机械、农用机械、紧固和夹具、传动机构和弹簧 / 控制装置等的设计。



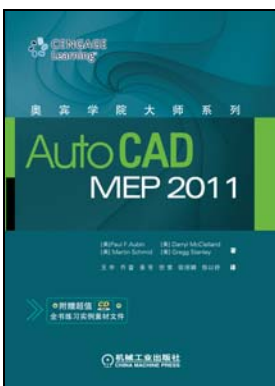
书名：HyperMesh&HyperView 应用技巧与高级实例

书号：978-7-111- 39535-5

作者：王钰栋 等

定价：99.00 元

★本书分两部分，前一部分主要介绍 HyperMesh 有限元前处理软件，包括 HyperMesh 的基础知识、几何清理、2D 网格划分、3D 网格划分、1D 单元创建、航空应用和主流求解器接口介绍，还包括关于 HyperMesh 的用户二次开发功能。后一部分主要介绍 HyperView、HyperGraph 等有限元后处理软件，包括用 HyperView 查看结果云图、变形图、结果数据、创建截面、创建测量点、报告模板等，用 HyperGraph 建立数据曲线、曲线的数据处理和三维曲线曲面的创建、处理等。



书名：奥宾学院大师系列：AutoCAD MEP 2011

书号：978-7-111- 39432-7

作者：[美]Paul F. Aubin 等著；王申 等译

定价：129.00 元

★本书是目前国内针对 AutoCAD®MEP 软件介绍、应用举例的权威用书，深入浅出地阐述了 AutoCAD®MEP 2011 的各项功能，对 AutoCAD MEP 软件的工作方法、基本原理和操作步骤进行了详细的介绍，并通过项目样例系统地介绍了如何使用该软件进行水、暖、电设计，更简明扼要地展示了如何进行各专业之间的协同。本书还特别介绍了如何创建各种类型的内容构件，字里行间的提示和小技巧亦是本书亮点之一，这些知识点均由本书作者通过积累多年的实战经验总结而成，为广大读者的实践旅程提供了捷径。

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

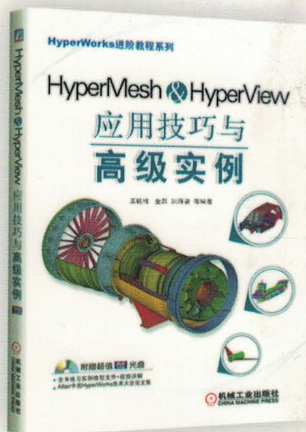
内容简介

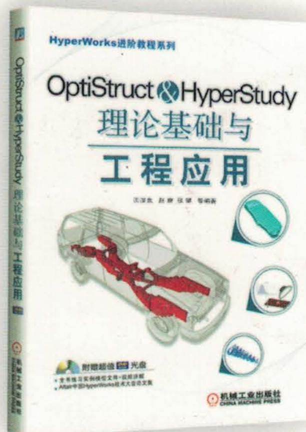
本书主要介绍了OptiStruct和HyperStudy的理论方法、基础练习、使用技巧和工程应用。

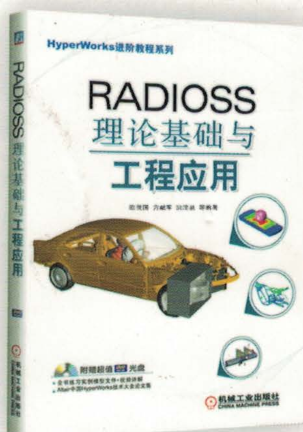
全书分上、下两篇。上篇是OptiStruct部分，主要介绍OptiStruct的基础理论和各种优化技术，以及部分优化卡片说明，并提供了大量练习实例和行业工程案例；下篇是HyperStudy部分，主要介绍HyperStudy的各种系统研究和优化方法，并提供了集成不同求解器进行优化设计的大量练习和案例。

本书由Altair中国公司技术团队编写，是Altair中国公司推荐的HyperWorks软件培训用书，可作为机械、汽车、航空航天、船舶、军工、重型装备、电气及家电等相关行业工程技术人员的自学或参考用书，也可作为理工院校相关专业师生的学习或者教学用书。

HyperWorks进阶教程系列







地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952

封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-40462-0

策划编辑◎丁 诚 张淑谦 / 封面设计◎



ISBN 978-7-111-40462-0



定价：99.00元（含1DVD）